



# ESCOLA NAVAL

*ta sântre obî-faire*



**Miguel Ângelo Moreira Fernandes**

## **Controlo de condição em motores elétricos de indução**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,  
na especialidade de Engenharia Naval, Ramo de Mecânica



**Alfeite**

**2019**

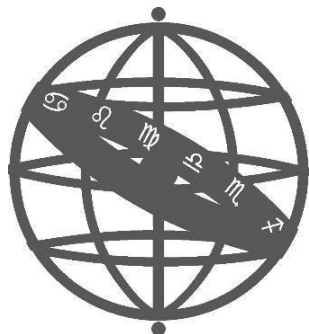




# ESCOLA NAVAL



ta sãnto e bñ-faire



**Miguel Ângelo Moreira Fernandes**

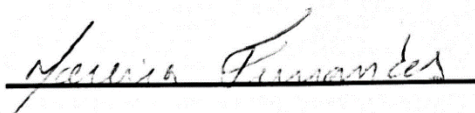
***Controlo de condição em motores elétricos de indução***

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,  
na especialidade de Engenharia Naval, Ramo de Mecânica

Orientação de: Prof. Chedas Sampaio

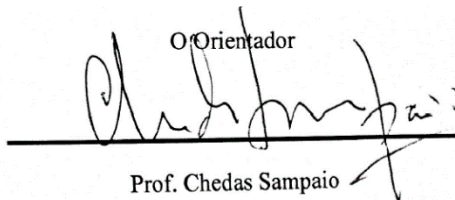
Coorientação de: Prof. Bruno Damas

O Aluno Mestrando



ASPOF EN-MEC Moreira Fernandes

O Orientador



Prof. Chedas Sampaio

**Alfeite**

**2019**



## **Epígrafe**

“No fim tudo dá certo, e se não deu certo é porque ainda não chegou ao fim.”

Fernando Sabino



## **Dedicatória**

Dedico esta dissertação aos meus pais e ao meu irmão, porque ao longo destes anos que me obrigaram a muito sacrifício e apesar de todas as pessoas que passaram até então pela minha vida, estes foram os que ficaram sempre contra tudo e contra todos.





## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Rui Chedas Sampaio e Prof. Bruno Damas, por toda a orientação, ajuda, conselhos, motivação e proximidade que tiveram ao longo da minha formação, assim como, ao longo da realização desta dissertação.

Aos vários professores que contribuíram para a minha formação na Escola Naval.

Ao CMG Maurício Barbosa pelo excelente exemplo que foi para mim enquanto comandante do corpo de alunos em parte do período da minha permanência na Escola Naval.

Ao meu enquadrante, 2TEN Martins Metelo, pelos valores que me transmitiu desde os primeiros dias da minha chegada à Escola Naval e que me guiam até hoje.

Aos meus camaradas e amigos, por todos os momentos de confiança, de apoio, de sacrifício e de amizade vividos.

Aos meus amigos, Rafael Teixeira e Micael Caseiro, pelos anos de amizade, lealdade, confiança, alegrias e pelos momentos em que acreditaram mais em mim do que eu próprio.

À minha amiga Isabela Corina, pela confiança e confiança depositada em mim.

Por fim, à minha família por todos os sacrifícios vividos por eles e com eles.

Muito obrigado!



## Resumo

O controlo de condição é uma área importante na manutenção. Um plano de manutenção baseado no controlo de condição permite acompanhar o estado de uma máquina e aferir qual o momento em que esta deixa de operar sob os seus parâmetros normais de funcionamento, começando a tender naturalmente para o estado de avaria, comprometendo, desta forma, todo o sistema a que esta esteja associada. Além da deteção de anomalias, o controlo de condição permite ainda diagnosticar qual o dano presente, através de padrões que se associam a danos específicos e que se têm vindo a validar ao longo dos anos. Estes padrões diferem com o tipo de dano, métodos e técnicas utilizados para a sua identificação.

Deste modo, o presente trabalho incide na sintetização do conhecimento existente relativo ao controlo de condição e no diagnóstico de falhas específicas pela aplicação da análise de vibrações, análise de corrente e análise termográfica, tomando o motor eléctrico de indução trifásico como objeto de estudo devido à sua enorme aplicabilidade na indústria e meio naval.

Inicialmente, sintetizaram-se os sintomas das falhas típicas em motores eléctricos de indução trifásicos para os três métodos de controlo de condição mencionados, recorrendo-se à bibliografia existente.

Reconhecendo-se a necessidade de validação experimental da sintomatologia recolhida e devido ao facto de os analisadores profissionais serem bastante dispendiosos, procedeu-se ao desenvolvimento de uma ferramenta computacional em LabVIEW capaz de efetuar análise de vibração e análise de corrente através de dados adquiridos por sensores *low-cost* e apropriados ao efeito.

Finalmente, a ferramenta acima mencionada foi utilizada para a aquisição e processamento das assinaturas presentes em motores eléctricos, propositadamente danificados, procurando-se verificar a concordância com a sintomatologia recolhida.

**Palavras-Chave:** Controlo de condição, motores eléctricos de indução, análise de vibração, análise de corrente, análise termográfica.



## **Abstract**

The condition monitoring is an important area in maintenance. A maintenance plan based on the condition monitoring allows monitoring the state of a machine and ascertain when it stops operating under its normal operating parameters starting to naturally tend to the failure state, which compromises the entire system to which it is associated. In addition to the detection of anomalies, the condition monitoring also allows to diagnose the damage present through patterns that are associated with specific damages and which have been validated over the years. These patterns differ with the type of damage, methods and techniques used to identify them.

The present work focuses on the synthesis of existing knowledge regarding condition monitoring and the diagnosis of specific failures by the application of vibration analysis, current analysis and thermographic analysis, taking the three phase induction electric motor as object of study due to the its enormous applicability in the industry and naval environment.

The symptoms of typical failures in three-phase induction electric motors were synthesized for the three mentioned condition monitoring methods using the existing literature about it.

Recognizing the necessity of experimental validation of the collected symptomatology and due to the fact that the existing professional analyzers are very expensive, a computer tool in LabVIEW capable of performing vibration analysis and current analysis was developed using a low cost and appropriate sensor to the effect.

Finally, the mentioned tool was used for the acquisition and processing of the signatures present in purposely damaged electric motors, trying to verify the collected symptomatology.

**Keywords:** Condition monitoring, induction electric motors, vibration analysis, current analysis, thermographic analysis.



# Índice

Epígrafe .....	iii
Dedicatória .....	v
Agradecimentos .....	vii
Resumo .....	ix
Abstract.....	xi
Índice .....	xiii
Índice de figuras .....	xxi
Índice de tabelas .....	xxix
Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos .....	xxxi
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação .....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Estrutura do trabalho.....	4
2. Estado da arte .....	7
3. Controlo de condição.....	13
3.1. Aquisição e processamento de sinal .....	18
3.1.1. Análise em frequência .....	21
3.1.2. <i>Leakage</i> .....	24
3.1.3. <i>Aliasing</i> .....	26

3.2. Normas.....	27
3.3. Métodos de controlo de condição mais comuns em motores elétricos de indução	30
3.3.1. Análise de vibrações .....	30
3.3.2. Análise de corrente .....	34
3.3.3. Análise termográfica.....	36
3.4. Instrumentação e sensores .....	41
4. Motor Elétrico de Indução.....	47
4.1. Constituição .....	47
4.2. Princípio de funcionamento .....	51
4.3. Importância no meio naval .....	56
4.4. Danos típicos .....	58
4.4.1. Desequilíbrio.....	58
4.4.2. Desalinhamento .....	60
4.4.3. Empeno .....	61
4.4.4. Folgas e Desaperto.....	62
4.4.5. Fricção do rotor no estator .....	63
4.4.6. Falha nos rolamentos .....	65
4.4.7. Ressonância .....	66
4.4.8. Chumaceiras de casquilho .....	67
4.4.9. Excentricidade do rotor.....	68
4.4.10. Problemas nas correias .....	69



4.4.11. Barras partidas .....	70
4.4.12. Omissão de fase .....	70
4.4.13. Curto-circuito.....	71
4.4.14. Falha no isolamento .....	71
4.4.15. Falha nas escovas.....	72
4.4.16. Desequilíbrio de fases.....	72
4.4.17. Sobrecarga .....	72
4.4.18. Fatores ambientais .....	73
5. Sintomatologia de danos mais comuns em motores elétricos de indução.....	75
5.1. Desequilíbrio.....	75
5.1.1. Análise de vibrações .....	75
5.1.2. Análise de corrente .....	76
5.1.3. Análise termográfica.....	77
5.2. Desalinhamento .....	77
5.2.1. Análise de vibrações .....	77
5.2.2. Análise de corrente .....	78
5.2.3. Análise termográfica.....	78
5.3. Empeno .....	78
5.3.1. Análise de vibrações .....	78
5.3.2. Análise de corrente .....	79
5.3.3. Análise termográfica.....	80
5.4. Desaperto .....	80

5.4.1. Análise de vibrações .....	80
5.4.2. Análise de corrente .....	81
5.4.3. Análise termográfica.....	81
5.5. Fricção do rotor no estator .....	81
5.5.1. Análise de vibrações .....	81
5.5.2. Análise de corrente .....	82
5.5.3. Análise termográfica.....	82
5.6. Falha nos rolamentos .....	82
5.6.1. Análise de vibrações .....	82
5.6.2. Análise de corrente .....	84
5.6.3. Análise termográfica.....	85
5.7. Excentricidade do rotor.....	85
5.7.1. Análise de vibrações .....	85
5.7.2. Análise de corrente .....	86
5.7.3. Análise termográfica.....	87
5.8. Barras partidas .....	87
5.8.1. Análise de vibrações .....	87
5.8.2. Análise de corrente .....	88
5.8.3. Análise termográfica.....	90
5.9. Omissão de fase .....	90
5.9.1. Análise de vibrações .....	91
5.9.2. Análise de corrente .....	91

5.9.3. Análise termográfica.....	91
5.10. Curto-Circuito.....	91
5.10.1. Análise de vibrações .....	91
5.10.2. Análise de corrente .....	92
5.10.3. Análise termográfica.....	92
5.11. Desequilíbrio de fases .....	93
5.11.1. Análise de vibrações .....	93
5.11.2. Análise de corrente .....	93
5.11.3. Análise termográfica.....	93
6. Demonstração experimental .....	95
6.1. Procedimento .....	95
6.2. Equipamentos utilizados.....	97
6.2.1. Motores elétricos e variadores de frequência .....	98
6.2.2. Sensores .....	100
6.2.3. Analisadores programados em LabVIEW .....	103
6.2.3.1. Analisador de vibrações.....	103
6.2.3.2. Analisador de corrente .....	106
6.3. Idealização de bancada didática para controlo de condição em motores elétricos de indução .....	108
6.4. Análise de Resultados.....	110
6.4.1. Desequilíbrio.....	110
6.4.1.1. Análise de vibrações .....	111

6.4.1.2. Análise de corrente .....	118
6.4.1.3. Termografia .....	119
6.4.2. Desaperto .....	120
6.4.2.1. Análise de vibrações .....	121
6.4.2.2. Análise de corrente .....	123
6.4.2.3. Termografia .....	124
6.4.3. Desequilíbrio de fases .....	124
6.4.3.1. Análise de vibrações .....	125
6.4.3.2. Análise de corrente .....	127
6.4.3.3. Termografia .....	131
6.4.4. Omissão de fase .....	132
6.4.4.1. Análise de vibrações .....	133
6.4.4.2. Análise de corrente .....	134
6.4.4.3. Termografia .....	136
6.4.5. Barras partidas .....	137
6.4.5.1. Análise de vibrações .....	138
6.4.5.2. Análise de corrente .....	141
6.4.5.3. Termografia .....	143
6.5. Discussão de Resultados .....	144
7. Conclusão .....	147
7.1. Conclusões gerais .....	147
7.2. Lições aprendidas .....	149

7.3. Trabalhos futuros .....	149
Bibliografia.....	151
Apêndices .....	159
Apêndice A – Tabela resumo da sintomatologia de danos em motores elétricos de indução	159
Apêndice B - Demonstração experimental. Simulação de danos .....	163
Apêndice C – Desenho técnico da base da bancada didática .....	167
Apêndice D – Desenho técnico da base do motor da bancada didática.....	169
Apêndice E – Desenho técnico das chumaceiras da bancada didática .....	171
Anexos.....	173
Anexo A – Termografia: Tabela com valores de emissividade de referência para diversos materiais	173
Anexo B – Termografia. Métodos de determinação de emissividade dos corpos	175
Anexo C – Termografia. Métodos de determinação de refletividade dos corpos	177
Anexo D – Medidas do motor elétrico NORDAC 63 L 4 .....	179
Anexo E – Desenho técnico das chumaceiras <i>Phidjets</i> .....	181



## Índice de figuras

Figura 1 Tipos de manutenção.....	13
Figura 2 Princípio básico de medição, no controlo de condição, que indica a evolução do estado de deterioração do equipamento .....	15
Figura 3 Funcionamento básico de um sistema de controlo de condição .....	17
Figura 4 Amostragem de um sinal analógico real .....	20
Figura 5 Exemplo de sistema de aquisição e processamento de sinal.....	21
Figura 6 Sinal no tempo (à esquerda) versus Sinal em frequência (à direita) .....	22
Figura 7 Correlação do sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência .....	23
Figura 8 Princípio do Leakage e a aplicação de janelas .....	25
Figura 9 Princípio do Aliasing .....	26
Figura 10 Típico filtro anti-aliasing com efeito roll-off .....	27
Figura 11 Limites de vibração ISO 10816 .....	29
Figura 12 Técnica do envelope - (a) Sinal no tempo de um rolamento defeituoso (b) Sinal modulado (c) Espetro de frequência do sinal modulado .....	32
Figura 13 Faixas de frequência na medição de vibração .....	33
Figura 14 Técnica de análise de corrente para deteção e diagnóstico de dano .....	35
Figura 15 Espetro eletromagnético .....	37
Figura 16 Energia emitida por um corpo negro a várias temperaturas segundo a Lei de Planck .....	38
Figura 17 Analisador de vibração SKF (à direita) e analisador de vibração portátil com acelerómetro piezoelétrico (à esquerda) .....	42

Figura 18 Sensor de proximidade .....	42
Figura 19 Equipamento de análise de corrente em motores elétricos .....	43
Figura 20 Pinça amperimétrica FLUKE (à esquerda) e sensor de corrente Phidgets (à direita) .....	43
Figura 21 Câmara termográfica FLIR E95 .....	44
Figura 22 Sensor fotoelétrico: Emissor e Recetor .....	44
Figura 23 Tipos de fixação do acelerómetro .....	45
Figura 24 Classificação dos motores elétricos .....	47
Figura 25 Estator de um motor de indução .....	48
Figura 26 Rotor em gaiola de esquilo .....	48
Figura 27 Rotor bobinado .....	49
Figura 28 Enrolamento trifásico .....	50
Figura 29 Constituição de um motor de indução .....	51
Figura 30 Campo girante em 6 instantes distintos .....	52
Figura 31 Curva típica torque-velocidade de um motor de indução .....	54
Figura 32 Princípio de funcionamento de um motor elétrico de indução .....	55
Figura 33 Motores elétricos trifásicos propulsores com rotor em gaiola de esquilo - Classe Viana do Castelo.....	56
Figura 34 Bomba do leme - Classe Tejo .....	57
Figura 35 Bomba de vácuo do circuito de sanitários - Classe Tejo .....	57
Figura 36 Compressor de ar de arranque de motores principais Classe Tejo.....	57
Figura 37 Bomba do circuito de água glicolada do sistema de ar condicionado Classe Tejo .....	57



Figura 38 Classificação do tipo de dano com base na bibliografia existente .....	58
Figura 39 Representação gráfica do desequilíbrio .....	59
Figura 40 Alinhamento correto, Desalinhamento paralelo, Desalinhamento angular ...	60
Figura 41 Exemplo de um acoplamento flexível.....	61
Figura 42 Correção de folga em uma das patas de um motor pela utilização de um calço calibrado .....	63
Figura 43 Fricção radial do rotor em um elemento estacionário .....	63
Figura 44 Possíveis locais de fricção do rotor .....	64
Figura 45 Forças geradas pela fricção do rotor .....	64
Figura 46 Constituição de um rolamento .....	65
Figura 47 Chumaceira de casquilho .....	68
Figura 48 Tipos de excentricidade no rotor .....	69
Figura 49 Exemplo de um espectro de frequência de um veio desequilibrado .....	75
Figura 50 Sintomas de desequilíbrio no caso de rotor suspenso .....	76
Figura 51 Sintomas de desalinhamento por análise de vibrações .....	77
Figura 52 Espectro de frequência típico para o empeno .....	79
Figura 53 Relação de fases na direção axial para o caso de empeno .....	79
Figura 54 Espectro de frequência típico para desaperto .....	80
Figura 55 Sintoma de fricção do rotor no estator por análise de vibrações .....	81
Figura 56 Exemplo termográfico de um motor com rolamentos danificados .....	85
Figura 57 Exemplo de um espectro de frequência para um motor com duas barras partidas .....	88

Figura 58 Exemplo de um espectro de frequência para um motor com um barra partida .....	89
Figura 59 Comparação de um motor saudável (esquerda) com um motor com barras partidas (direita) através da análise termográfica .....	90
Figura 60 Comparação de um motor saudável (esquerda) com um motor com anel condutor partido (direita) através da análise termográfica .....	90
Figura 61 Comparação de um motor saudável (esquerda) com um motor em curto-circuito (meio e direita) através da análise termográfica .....	92
Figura 62 Exemplo de padrão térmico de desequilíbrio de carga em uma das fases ....	93
Figura 63 Simulador de técnicas de controlo de vibrações .....	97
Figura 64 Bancada didática Spetraquest.....	98
Figura 65 Motor elétrico de indução em uma base metálica apoiada em quatro molas .	98
Figura 66 Variador de frequência presente associado aos motores da Figura 63 e Figura 65 (à esquerda) e Variador de frequência e tacómetro da bancada presente na Figura 64 (à direita) .....	100
Figura 67 Acelerómetro Phidgets .....	101
Figura 68 Placa de aquisição National Instruments USB-6008 e transformadores de corrente .....	101
Figura 69 Camara termográfica.....	102
Figura 70 Analisador de vibrações - Detecção de anomalias por comparação com normas .....	104
Figura 71 Analisador de vibrações - Display da informação fornecida pelos acelerómetros .....	104
Figura 72 Analisador de vibração.....	105
Figura 73 Setup analisador de vibrações .....	106

Figura 74 Analisador de corrente .....	107
Figura 75 Analisador de corrente para as 3 fases .....	107
Figura 77 Analisador de corrente - Frequências típicas de dano programadas .....	108
Figura 78 Projeto de bancada didática para controlo de condição em motores elétricos de indução .....	109
Figura 79 Amplitude de vibração nas 3 direções para o caso de desequilíbrio.....	111
Figura 80 Comparação do nível de vibração entre o motor saudável e o motor desequilibrado para o caso de rotor suspenso.....	112
Figura 81 Comparação entre a vibração radial e axial para caso de desequilíbrio em rotor suspenso.....	112
Figura 82 Comparação entre a vibração horizontal e vertical para o caso de desequilíbrio em rotor suspenso .....	113
Figura 83 Comparação do espectro de frequência entre o motor saudável e o motor desequilibrado para o caso de rotor suspenso.....	113
Figura 84 Evolução da componente 1xRPM conforme a frequência de rotação do motor .....	114
Figura 85 Evolução da componente 1xRPM conforme o aumento da massa de desequilíbrio .....	115
Figura 86 Simulação de desequilíbrio em WorkingModel.....	116
Figura 87 Desequilíbrio - Espectro de frequência obtido para a direção vertical através de simulação em WorkingModel .....	116
Figura 88 Simulação informática - Órbita do motor para diferença de mobilidades de 0 % (à esquerda) e de 80 % (à direita) .....	117
Figura 89 Relação entre a mobilidade dos eixos e a diferença de fase nos mesmos....	117
Figura 90 Análise de corrente - Sinal o tempo para o caso de desequilíbrio .....	118

Figura 91 Análise de corrente - Espectro de frequência para o caso de desequilíbrio...	119
Figura 92 Fixação do motor à base metálica .....	120
Figura 93 Apoio partido por fadiga devido a desaperto .....	120
Figura 94 Amplitude de vibração nas 3 direções para o caso de 1 apoio desapertado.	121
Figura 95 Amplitude de vibração nas 3 direções para o caso de 2 apoios desapertados .....	121
Figura 96 Comparação entre espectros para apoios apertados e 1 apoio desapertado ...	122
Figura 97 Comparação entre espectros para 1 apoio desapertado e 2 apoios desapertados .....	122
Figura 98 Variação da fase no tempo para as situações de apoios apertados e apoios desapertados .....	123
Figura 99 Análise de corrente - Sinal no tempo para o caso de desaperto .....	123
Figura 100 Análise de corrente - Espectro de frequência para o caso de desaperto .....	124
Figura 101 Motor com reóstato em série com uma das fases.....	125
Figura 102 Amplitude de vibração radial para o desequilíbrio de fases .....	126
Figura 103 Espectro de frequência para o caso de fases desequilibradas .....	126
Figura 104 Espectro de frequência em dB para o caso de fases desequilibradas.....	127
Figura 105 Análise de corrente - Sinal no tempo para as 3 fases do motor consoante o valor de resistência aplicada a uma das fases .....	128
Figura 106 Análise de corrente - Sinal no tempo para uma fase desequilibrada.....	129
Figura 107 Análise de corrente – Espectro de frequência para as 3 fases do motor consoante o valor de resistência aplicada a uma das fases .....	129
Figura 108 Análise de corrente - Espectro de frequência para uma fase desequilibrada	130

Figura 109 Análise Termográfica: a) Motor saudável b) Motor com fases desequilibradas c) Caixa de ligações motor saudável d) Caixa de ligações motor com fases desequilibradas .....	132
Figura 110 Amplitude de vibração radial para o caso de perda de fase .....	133
Figura 111 Espetro de frequência para o caso de perda de fase .....	134
Figura 112 Corrente do motor com as 3 fases presentes .....	135
Figura 113 Corrente do motor com Fase 2 omissa.....	135
Figura 114 Comparação de corrente de uma das fases do motor saudável com o valor teórico e valor real de corrente em situação de fase omissa.....	136
Figura 115 Espetro de frequência - Comparação entre motor saudável e motor com fase omissa .....	136
Figura 116 Análise Termográfica: a) Motor Saudável b) Motor com fase omissa c) Caixa de ligações motor saudável d) Caixa de ligações motor com fase omissa .....	137
Figura 117 Carga colocada no motor em estudo .....	138
Figura 118 Comparação da amplitude de vibração radial e axial no motor com barras partidas .....	138
Figura 119 Espetro de frequência - Comparação entre motor saudável e motor com barras partidas .....	139
Figura 120 Espetro de frequência obtido pela utilização do acelerómetro Phidjets.....	140
Figura 121 Espetro de frequência obtido pela utilização de acelerómetro piezoelétrico .....	140
Figura 122 Análise de corrente: Sinal no tempo para motor com barras partidas.....	141
Figura 123 Análise de corrente: Espetro de frequência para motor com barras partidas .....	142

Figura 124 Análise de corrente: Zoom ao espectro de frequência para motor com barras partidas .....	142
Figura 125 Análise Termográfica: a) Motor saudável b) Motor com barras partidas c) Motora saudável frente d) Motor com barras partidas frente .....	143
Figura 126 Atividade experimental em bancada Escola Naval .....	163
Figura 127 Atividade experimental em bancada Spectraquest.....	163
Figura 128 Desequilíbrio - Rotor com massa de desequilíbrio .....	164
Figura 129 Transformador de corrente instalado em uma das fases de motor elétrico	164
Figura 130 Impressão de rotor para simulação de desequilíbrio .....	164
Figura 131 Rotor impresso instalado em motor elétrico .....	165
Figura 132 Maquinação de componentes para construção de bancada didática .....	165
Figura 133 Chumaceiras com furos roscados para implementação de chumaceira Phidjets .....	166
Figura 134 Processo de montagem de bancada didática .....	166
Figura 135 Desenho técnico da base da bancada didática.....	167
Figura 136 Desenho técnico da base do motor da bancada didática .....	169
Figura 137 Desenho técnico das chumaceiras da bancada didática .....	171
Figura 138 Método refletor .....	177
Figura 139 Método direto - passo 2 .....	178
Figura 140 Método direto - passo 3 .....	178
Figura 141 Medidas motor elétrico NORDAC 63 L 4 .....	179
Figura 142 Desenho técnico chumaceira Phidjets .....	181

## Índice de tabelas

Tabela 1 Frequências de dano em rolamentos .....	82
Tabela 2 Frequências de dano em rolamentos obtidas estatisticamente.....	83
Tabela 3 Frequências de dano devido à excentricidade .....	86
Tabela 4 Características dos motores elétricos da Figura 63 e Figura 65 .....	98
Tabela 5 Características dos motores elétricos da Figura 64 .....	99
Tabela 6 Características dos acelerômetros .....	100
Tabela 7 Características da placa de aquisição.....	101
Tabela 8 Características da camera termográfica .....	102
Tabela 9 Relação entre resistência em uma das fases e a frequência de alimentação solicitada pelo motor .....	130
Tabela 10 Tabela resumo da sintomatologia em motores elétricos de indução .....	159
Tabela 11 Valores de referência de emissividade para diversos materiais .....	173





## Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

$B_r$  (Campo magnético presente no rotor)

$B_s$  (Campo magnético presente no estator)

BNN (*The Back-propagation Neural Network*)

$df$  (Resolução em frequência)

$dt$  (Resolução no tempo)

DFT (*Discrete Fourier Transform*)

DNV – GL (*Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd*)

EN – Escola Naval

FFT (*Fast Fourier Transform*)

$f_a$  (Frequência de amostragem)

$f_{bp}$  (Frequência de dano para barras partidas)

$F_c$  (Força centrífuga)

$f_{cc}$  (Frequência de curto-circuito)

$f_{der}$  (Frequência de dano em rolamento para análise de corrente)

$f_e$  (Frequência elétrica de alimentação do estator)

$f_{esc}$  (Frequência de escorregamento)

$f_{ext}$  (Frequência de dano na pista exterior do rolamento)

$f_{exes}$  (Frequência de excentricidade estática)

$f_{exdi}$  (Frequência de excentricidade dinâmica)

$f_{exbf}$  (Baixas frequências para excentricidade)

$f_{ex}$  (Frequências de excentricidade para análise de corrente)

$f_{gai}$  (Frequência de dano na gaiola do rolamento)

$f_{int}$  (Frequência de dano na pista interior do rolamento)

$f_r$  (Frequência de rotação do rotor)

$f_{rol}$  (Frequência de dano no elemento rolante do rolamento)

$f_{ress}$  (Frequência de ressonância)

$f_{mis}$  (Frequência de desalinhamento)

$f_n$  (Frequência natural)

$F_N$  (Frequência de *Nyquist*)

$f_{pc}$  (Frequência de passagem das cavas)

$f_{pp}$  (Frequência de passagem dos polos)

$f_{unb}$  (Frequência de desequilíbrio)

GAV (Gabinete de Avaliação de Condição)

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

ISO (*International Organization for Standardization*)

MP (Marinha Portuguesa)

MCSA (*Motor Current Signature Analysis*)

NN (*The Nearest Neighbour Classifier*)

$n$  (Velocidade do rotor)

$n_s$  (Velocidade de sincronismo)

NP EN (Norma Portuguesa)

P (Número de polos)

RMS (*Root Mean Square*)

RPM (Rotações por minuto)

$s$  (Escorregamento)

$T$  (Binário)

TF (Transformada de Fourier)

ZCT (*Zero Crossing Time*)



# **1. Introdução**

## **1.1. Motivação**

Da mesma forma que o ser humano adoece, também as máquinas se avariam. O racional lógico para evitar a situação de avaria é bastante semelhante ao para evitar a doença. O ser humano deve realizar análises periódicas com o intuito de averiguar a condição do seu corpo e a existência de algum indicador de doença. O mesmo deve ser efetuado com as máquinas em que, através de métodos apropriados, aplicados por técnicos especializados, se realizam análises às mesmas obtendo-se parâmetros indicadores de dano. Com esta avaliação torna-se possível verificar o estado das máquinas, bem como identificar a existência de uma anomalia a tempo de ser reposta a normalidade com atividades de manutenção relativamente simples e sem a necessidade de paragem dos sistemas, tal como acontece com o ser humano, em que a deteção precoce de uma doença aumenta a probabilidade da sua cura.

A deteção precoce de um dano é conseguida através da aplicação de uma filosofia de manutenção assente no controlo de condição. A deteção de danos através de métodos não invasivos ajuda a poupar dinheiro, tempo e esforços humanos quando comparado com uma ação de manutenção que vise repor o estado de condição do motor.

O controlo de condição permite aumentar a disponibilidade dos equipamentos, exatamente uma das necessidades básicas da MP (Marinha Portuguesa), uma vez que, a deteção atempada de anomalias ao normal funcionamento dos equipamentos permite o planeamento de ações de manutenção sem que estes cheguem a ficar inoperacionais. Este controlo é efetuado através da realização de análises periódicas pelos mais variados métodos de controlo de condição, de onde se extraem parâmetros indicadores de dano regulamentados pelas mais diversas normas existentes, destacando-se a análise de vibrações, análise de corrente, análise acústica, análise termográfica, entre outros.

Além do aumento da disponibilidade dos equipamentos, diversas empresas diminuíram os custos de manutenção a partir do momento que adotaram um plano de manutenção assente no controlo de condição, isto devido maioritariamente à redução na manutenção corretiva e à extensão do período entre revisões, o que também conduziu a uma redução de sobressalentes necessária em armazém [1].

A presente dissertação pretende estudar o controlo de condição, tendo como objeto de estudo o motor elétrico de indução trifásico, devido à sua importância e enorme aplicação na indústria e meio naval.

Cerca de 80% dos motores elétricos utilizados na indústria são motores elétricos de indução [2], sendo maioritariamente destinados ao acionamento de diversos equipamentos, em detrimento dos acionamentos hidráulicos e pneumáticos. Desta forma, o motor elétrico é um equipamento crítico<sup>1</sup> de qualquer sistema em que esteja presente. O conhecimento dos diversos danos prováveis de ocorrer em motores elétricos de indução e dos seus sintomas permite o avanço científico na área do controlo de condição na medida em que permite estudar, criar e validar novos métodos de deteção e diagnóstico de dano em motores elétricos de indução trifásicos.

Na MP a aplicação do controlo de condição ainda é uma realidade muito pouco presente. Contudo, a MP tem vindo a desenvolver uma doutrina de manutenção assente na manutenção condicionada, expressa em várias publicações, com o objetivo principal de assegurar níveis de disponibilidade do material compatíveis com os programas de utilização operacional estabelecidos. Contudo, devido aos constrangimentos existentes, nomeadamente financeiros e de disponibilidade para realização das devidas ações de manutenção, verifica-se o constante recurso à manutenção corretiva para solução das inúmeras avarias existentes nos navios da esquadra.

Outra expressão da aplicação do controlo de condição na MP é a criação do GAV (Gabinete de Avaliação de Condição) que recorre essencialmente a análise de vibrações, análise de fluidos e análise termográfica para acompanhamento dos equipamentos a bordo dos navios da esquadra. Contudo, a realização destas análises é facultativa não sendo extensível a todos os navios da esquadra nem a todos os equipamentos do navio.

Os engenheiros de bordo, devido ao elevado empenhamento operacional dos navios, à dependência de terceiros para realização de ações de manutenção adequadas e essencialmente a limitações de natureza financeira, não beneficiam das vantagens do controlo de condição, prolongando por longos períodos a realização de corretas ações de

---

<sup>1</sup> A sua imobilização determina alterações sensíveis na produção de bens, quer porque origina paragem da produção, quer porque reduz significativamente a produtividade.

manutenção, acabando o estado dos equipamentos por culminar inevitavelmente no estado de avaria, o que compromete a disponibilidade do navio.

## **1.2. Objetivos**

Esta dissertação tem como objetivos principais:

- O estudo do controlo de condição e métodos existentes;
- A sintetização do conhecimento existente sobre o controlo de condição em motores elétricos de indução;
- A validação experimental de algum desse conhecimento.

## **1.3. Metodologia**

A presente dissertação foi desenvolvida com base nas seguintes fases.

Numa primeira fase procurou-se essencialmente investigar quais os trabalhos já desenvolvidos na área do controlo de condição em motores elétricos, principalmente nos de indução e tentar obter uma perceção do avanço científico e tecnológico na dita área.

De seguida, efetuou-se um estudo em torno do motor elétrico de indução, estudando-se a sua constituição e quais os conceitos físicos presentes no seu modo de funcionamento. Esta fase teve como objetivo específico conseguir, na fase seguinte, compreender a relação entre o controlo de condição e o motor elétrico de indução e de que modo será viável atribuir um plano de manutenção assente no controlo de condição a este equipamento em concreto.

Seguidamente, efetuou-se um estudo geral em torno do controlo de condição e dos métodos maioritariamente utilizados, e um estudo particular, tendo-se escolhido três métodos de controlo de condição: a análise de vibrações, a análise de corrente e a análise termográfica.

Na quarta fase recolheu-se uma coletânea de sintomas referente a um determinado número de danos específicos para os métodos de controlo de condição escolhidos.

Por fim, teve-se como objetivo validar experimentalmente a sintomatologia recolhida na fase anterior e aferir a veracidade das vantagens do controlo de condição em motores elétricos de indução pelos três métodos referidos.

#### **1.4. Estrutura do trabalho**

A presente dissertação encontra-se estruturada em capítulos.

O capítulo 1 faz a introdução ao presente trabalho. Este capítulo inclui a informação necessária capaz de justificar a escolha do tema e a sua importância.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte, sendo feita uma breve súmula de trabalhos já efetuados e desenvolvidos alusivos ao tema da presente dissertação.

O capítulo 3 apresenta uma descrição do que é o controlo de condição, como é que este funciona e como é que este se relaciona com outras áreas científicas, como é o caso da aquisição e processamento de sinal.

O capítulo 4 apresenta a constituição do motor elétrico de indução trifásico, o seu princípio de funcionamento e quais os danos típicos e propícios de acontecer nesta máquina.

O capítulo 5 é considerado um dos capítulos fundamentais da presente dissertação e apresenta, de forma resumida, os sintomas de parte dos danos apresentados no capítulo anterior para os três métodos de controlo de condição estudados, tendo por base a bibliografia existente.

O capítulo 6 é também um dos capítulos fundamentais da presente dissertação. Neste capítulo é apresentada a componente prática desenvolvida nesta dissertação, apresentando-se os equipamentos utilizados, as ferramentas desenvolvidas informaticamente e os resultados obtidos da aplicação dos métodos estudados a danos propositadamente implementados e conhecidos em motores elétricos.

Finalmente, no capítulo 7 são aferidas as conclusões gerais de todo o trabalho desenvolvido e conhecimentos adquiridos.



Todo o trabalho foi desenvolvido tendo em consideração as normas de referenciação previstas pela IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), normas de referenciação comumente utilizadas na área científica em que se insere a presente dissertação.

A presente dissertação ultrapassa o limite de 90 páginas imposto pelas normas da Escola Naval, tal facto deve-se ao elevado número de imagens, tabelas e essência descritiva do próprio tema.



## **2. Estado da arte**

A evolução tecnológica permitiu que, desde os anos 70, se alinhasse as aplicações informáticas à manutenção e se desenvolvessem e experimentassem vários métodos e técnicas na área do controlo de condição, o que levou à implementação de sistemas integrados de manutenção na década seguinte, que foram evoluindo com a evolução dos sistemas de aquisição e processamento de sinal. Nos dias de hoje, estes sistemas e métodos são maioritariamente aceites pela indústria e aplicados por si aos mais diversos equipamentos.

O motor elétrico de indução trifásico é um dos equipamentos presentes que assume um papel muito importante na indústria, sendo ampla a sua enorme aplicabilidade nos mais diversos sistemas. A sua crescente aplicação estimulou a procura de motores elétricos com valores de rendimento cada vez mais elevados e com a maior fiabilidade possível, o que conduziu a um aumento dos estudos realizados nesta área. Uma forma de aumentar a fiabilidade de qualquer equipamento é atuar de um modo preventivo, isto é, conhecendo-se periodicamente a condição do equipamento é possível atuar de forma a evitar o estado de avaria do mesmo.

Ao longo dos anos, os investigadores, tem procurado estudar e analisar as assinaturas provocadas pelas mais diversas falhas em motores elétricos e os métodos e técnicas de controlo de condição passíveis de serem aplicados a si, advindo daqui inúmeros trabalhos publicados dos quais alguns são referidos em seguida.

Em 1998, Thorsen e Dalva [3], apresentam uma sinopse sobre os métodos de controlo de condição, tanto como ferramenta de deteção como de diagnóstico de dano. O estudo apresentado indica como diferentes tipos de danos geram diferentes componentes de frequência, tendo-se aplicado a análise de corrente para demonstrar a deteção de barras partidas e falhas em rolamentos. É referida ainda, a aplicação de métodos estatísticos de processamento de sinal à análise de vibrações em rolamentos. Isto é, sabendo-se que um rolamento em boas condições possui uma distribuição Gaussiana dos seus valores de frequência, basta que os dados provenientes do acelerómetro disturbem esta distribuição para se concluir a existência de alguma anomalia.

Em 2005, Nandi et al. [4], publicam uma revisão bibliográfica onde descrevem diferentes tipos de falhas em motores elétricos de indução, métodos e técnicas para o seu diagnóstico e as assinaturas de vibração e corrente que estas geram, bem como é discutida a automatização dos sistemas de detecção e diagnóstico através da aplicação de algoritmos baseados em inteligência artificial. Concluindo os autores que grande parte da bibliografia existente até então atribui uma enorme importância à análise de corrente no diagnóstico de falhas em motores elétricos. Contudo, verificam que uma das grandes dificuldades à realização de um diagnóstico claro é a capacidade de distinção entre frequências de dano e outro tipo de frequências que possam existir pelos mais diversos motivos.

Em 2006, Basak et al. [2], apresentam uma análise estatística alusiva ao aumento da fiabilidade dos sistemas quando estes adotam uma filosofia de controlo de condição, mostrando que a aplicação de um sistema de controlo de condição 80% eficiente consegue aumentar substancialmente a fiabilidade do sistema. Apresentam também uma breve revisão bibliográfica relativa às assinaturas de diversos danos através de vários métodos, como a análise de corrente, análise de vibrações, análise termográfica, análise de potência e análise de torque.

Em 2006, Liu e Ganeriwala [5], estudam o diagnóstico de barras partidas através da análise de corrente, recorrendo a utilização de um simulador de falhas em motores elétricos produzidos pela *SpectraQuest*. Utilizaram 3 motores de indução com rotor em gaiola de esquilo, um saudável e outros dois, respetivamente, com 3 e 6 barras partidas. Fixaram a alimentação do motor em 35 Hz e ao longo das experiências foram variando a carga do motor para perceber qual a influência desta na assinatura de corrente do mesmo. Os dados obtidos foram analisados através do *VibraQuest*, software também desenvolvido pela *SpectraQuest*. Concluindo-se que os motores com barras partidas, comparativamente ao motor saudável, apresentam no espetro de corrente alterações significativas de amplitude nas frequências de banda lateral em torno da frequência de alimentação, tendo-se verificado que o efeito da carga na amplitude destas frequências não varia de forma muito clara, sendo difícil reconhecer uma tendência.

Em 2008, Blodt et al. [6], investigam a detecção de falhas em rolamentos através da análise de corrente do estator e propõe um novo modelo de falhas relacionadas com a variação do espaço no entreferro e no torque da carga. Conduziram também um estudo experimental com vários rolamentos defeituosos, medindo a vibração, o torque do motor

e a corrente do estator, revelando a análise espectral alterações no espectro de corrente de acordo com os valores de frequência apresentados teoricamente.

Em 2009, Mertens Jr. e Ribeiro [7], utilizam a análise de vibração e de corrente em simultâneo para a deteção de barras partidas em motores elétricos de indução presentes em compressores herméticos. Utilizou-se a análise de corrente devido à sua sensibilidade e a análise de vibração de modo a obter indiretamente o valor de rotação do rotor. O objetivo foi utilizar a análise de vibração para, de forma não intrusiva, desvendar o valor de rotação do rotor e utilizar este valor no cálculo correto do escorregamento do motor e, conseqüentemente, das frequências anormais geradas pelo dano em questão. A atividade experimental foi realizada pela utilização de vários motores com diferente número de barras partidas e diferentes ângulos entre estas. No final, conseguiu-se comprovar que o método em questão é eficaz na maioria dos casos, bem como que a posição das barras partidas influencia na sua deteção.

Em 2010, Duan [8], estuda o diagnóstico de barras partidas e curto-circuito no estator em motores de indução industriais através dos métodos da análise da assinatura de corrente ou MCSA (*motor current signature analysis*) e ZCT (*zero crossing time*), ambos baseados na deteção de bandas laterais em torno da frequência de alimentação do estator. Após a revisão bibliográfica dos dois tipos de danos e métodos apresentados, procedeu-se à validação experimental dos mesmos recorrendo-se à implementação dos métodos estudados através dos softwares MATLAB e LabVIEW, tendo-se obtido resultados muito próximos dos valores teóricos estudados, tendo o método ZCT revelado vantagens sobre o MCSA, nomeadamente pelo facto de necessitar de uma frequência de amostragem menor e ser mais fácil de implementar computacionalmente. Foi também estudada a possibilidade de a instalação imprópria do motor afetar o diagnóstico. Por exemplo, problemas nos acoplamentos levam a existência de frequências inesperadas e o desalinhamento aumenta a amplitude das frequências de dano para o curto circuito. Conclui-se que a instalação imprópria do motor pode levar a diferenças significativas no diagnóstico de motores do mesmo tipo, diminuindo a precisão do diagnóstico de falhas em motores elétricos.

Em 2012, Gritli et al. [9], investigam a deteção de barras partidas em motores elétricos de indução utilizando a análise de vibração e a análise de corrente. Realizaram várias medições, através dos dois métodos mencionados, em motores saudáveis e motores

defeituosos, com condições de carga variáveis. Nas várias medições procuraram identificar essencialmente as frequências de banda lateral típicas deste dano e as alterações nos padrões de vibração radial e axial, concluindo que a análise de corrente poderá ser falível em certos casos, correntes entre barras podem diminuir a amplitude das frequências de dano. Por outro lado, a adoção da análise de vibração em complemento à análise de corrente poderá ser um bom modo de ultrapassar esta limitação, uma vez que, esta revelou assinaturas na direção axial bastante significativas.

Em 2013, Bhowmik et al. [10], publicam um trabalho em que apresentam uma revisão bibliográfica de vários tipos de falhas em motores elétricos de indução, métodos de controlo de condição capazes de as detetar e o *design* típico de um sistema de controlo de condição. É dada ênfase a problemas, como falhas em rolamentos, excentricidade do rotor e curto-circuito. São mostrados exemplos práticos da deteção de problemas em rolamentos através da análise de vibração, de problemas no estator através da abordagem vetorial de *Park* e a deteção de barras partidas e de excentricidade através da análise de corrente, sendo apresentados outros métodos associados às falhas que têm melhor capacidade de detetar. É também feita referência a técnicas inteligentes, como sistemas *fuzzy* e redes neuronais, aplicadas ao controlo de condição de motores elétricos.

Em 2014, Amaral [11], efetua uma revisão bibliográfica de um grande conjunto de danos típicos em motores elétricos de indução e da sua sintomatologia com base na análise de vibração, análise de corrente e análise termográfica, procurando validar experimentalmente os casos de barras partidas, dano na pista interior de um rolamento, curto-circuito, excentricidade e desequilíbrio. Para isto, o autor implementou estes danos em vários motores elétricos e procedeu à leitura das assinaturas dos mesmos, concluindo que a análise de vibrações permite detetar danos em fases incipientes, mas que tal apresenta certas dificuldades, como por exemplo o caso das frequências de dano se confundirem com as demais, obrigando à experiência do analista. A análise de corrente apresentou resultados limpos, encontrando-se bastantes semelhanças nas assinaturas obtidas e as referidas na teoria. No que se refere à análise termográfica, de um modo geral, esta não mostrou resultados satisfatórios.

Em 2014, Bindu e Thomas [12], referem a envolvimento da aquisição e processamento de sinal no controlo de condição, bem como a aplicação de várias técnicas, como inteligência artificial, redes neuronais, lógica *fuzzy*, classificadores *Baysianos*, entre

outros algoritmos nos mais diversos sistemas, para a realização de diagnósticos mais assertivos. Apresentam também uma revisão bibliográfica de diversos danos em motores elétricos, as suas causas, efeitos e métodos capazes de detetar e diagnosticar a sua existência. Referem ainda que as simulações destes danos podem não se aproximar da realidade devido às condições em que são realizadas, sendo necessário continuar a investir na sua validação experimental tentando-se controlar as diversas variáveis existentes, como os efeitos da alimentação do motor e as oscilações de carga. Apresentam resultados experimentais que sugerem que problemas como barras partidas e variações de carga podem ser identificados através da análise de corrente, referindo-se que os resultados obtidos experimentalmente apoiam o modelo matemático existente para as componentes espectrais previstas em problemas deste tipo.

Em 2015, Silveira [13], procura aprofundar o método de análise de ultrassons no controlo de condição, considerando-o como sendo um ensaio não destrutivo, repleto de vantagens e pouco utilizado em Portugal. O autor efetua uma comparação entre o método mencionado e a análise de vibrações, pelo facto de este ser o método mais utilizado e divulgado no controlo de condição. Esta comparação é feita pela análise de rolamentos defeituosos em ventiladores industriais e numa bancada didática em laboratório, pelos dois métodos referidos e nas mesmas condições de funcionamento, mostrando os resultados obtidos pela análise de vibrações, a confirmação de defeito na pista externa do rolamento, e os obtidos pela análise de ultrassons sucesso na distinção entre os estados de rolamento saudável e rolamento danificado. Tanto a análise de vibrações como a análise de ultrassons conseguiram identificar alterações nas assinaturas obtidas, comprovando a viabilidade da aplicação destes métodos no controlo de condição. Contudo, o autor realça que a análise dos sons audíveis e dos níveis sonoros dependem da experiência do analista, sendo esta uma das dificuldades da aplicação e generalização deste método.

Em 2017, Glowacz e Glowacz [14], desenvolvem uma ferramenta em MATLAB baseada na análise termográfica para a deteção de barras partidas em motores elétricos de indução. O método apresentado baseia-se na extração de imagens térmicas posteriormente comparadas com um conjunto de treino, com o objetivo de serem classificadas, identificando-se às áreas significativamente alteradas pela presença de barras partidas. Na implementação deste método são utilizados como classificadores o

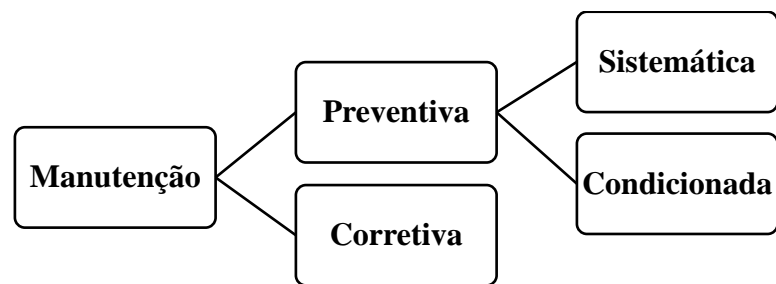
BNN (*The back-propagation neural network*), o *K-means* e o NN (*The Nearest Neighbour classifier*). Os autores analisaram imagens térmicas de três estados diferentes: motor elétrico saudável, com duas barras partidas e com anel condutor partido, concluindo que o método proposto é eficaz, tendo os classificadores utilizados conseguido identificar os casos de barras partidas com uma eficiência de 100%.



### 3. Controlo de condição

A norma portuguesa NP-EN 13306 2007 [15] define a manutenção como a combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado que possa cumprir a função requerida, interpretando-se um bem como qualquer componente, unidade funcional, equipamento ou sistema que pode ser considerado individualmente [15]. Um motor elétrico é exemplo de um bem. Cada bem desempenha uma função, ou uma combinação de funções, designada como função requerida, considerada como necessária para fornecer um dado serviço [15]. Um motor elétrico tem como função requerida a transformação de energia elétrica em energia mecânica.

A manutenção divide-se em vários tipos e possui várias estratégias. Sendo de maior relevância os tipos de manutenção presentes na Figura 1.



**Figura 1 Tipos de manutenção**

A manutenção preventiva sistemática é o tipo de manutenção efetuada a intervalos de tempo pré-estabelecidos ou segundo um número definido de unidades de utilização, mas sem controlo prévio do estado do bem [15]. Verifica-se, por exemplo, quando se troca o óleo de um gerador ao fim de um determinado período de tempo ou determinadas horas de utilização, sem se verificar o estado de conservação do óleo.

A manutenção preventiva condicionada baseia-se na vigilância do funcionamento de um bem e/ou parâmetros significativos desse funcionamento, integrando as ações daí decorrentes [15]. É o tipo de manutenção executada quando se efetua uma inspeção não programada a um gerador, por se ter verificado que este gera corrente com valores de frequência instáveis.

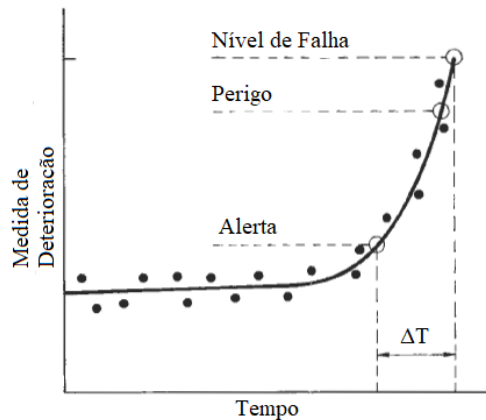
A manutenção corretiva é o tipo de manutenção efetuada depois da deteção de uma avaria e destina-se a repor o bem num estado em que possa realizar a sua função

requerida [15]. É o que acontece quando se executa a substituição do êmbolo de um dos cilindros da máquina principal após este partir, impossibilitando o seu funcionamento.

Em suma, a manutenção tem como principal finalidade reduzir a probabilidade de avaria ou degradação do funcionamento de um bem, assim como aumentar a disponibilidade, reduzir os custos, aumentar a qualidade do produto, preservar o ambiente e aumentar a segurança do material e do pessoal [15].

O controlo de condição é uma atividade de manutenção, definido como a atividade executada manual ou automaticamente quando o bem se encontra disponível, com os objetivos de observar o seu estado atual, avaliar a evolução de determinados parâmetros no tempo e identificar o dano, prevendo a condição futura do bem e evitando a avaria ou falha catastrófica [15], [16]. Enquadra-se na manutenção preventiva condicionada, uma vez que as ações de reparação ou substituição são condicionadas pelo conhecimento real da condição da máquina.

O princípio básico do controlo de condição passa pela execução de medições periódicas não destrutivas capazes de indicar a ocorrência de deterioração na máquina. Qualquer tendência ascendente pode indicar a existência de um problema, como mostrado na Figura 2, que ilustra uma típica curva de tendência e a forma como esta fornece um alerta relativo a uma falha incipiente que se aproxima, restando ainda um intervalo de tempo entre uma situação de perigo e a falha total para planeamento, requisição de material e implementação de uma adequada ação de manutenção orientada de melhor forma pelo tipo de trabalho previsto [17].



**Figura 2 Princípio básico de medição, no controlo de condição, que indica a evolução do estado de deterioração do equipamento <sup>2</sup>**

As medições são realizadas pelos diversos métodos de controlo de condição existentes e consoante o tipo de máquina. Daqui é aferida a existência, ou não, de dano, correspondendo o dano à situação em que um bem continua a cumprir com a função requerida com desempenho aceitável, mas inferior aos valores especificados da referida função, distinguindo-se de avaria, que é a cessação da aptidão de um bem para cumprir uma função requerida [15].

A identificação do dano tem duas fases que ocorrem em tempos diferentes e utilizam recursos completamente distintos [18]:

- a deteção;
- o diagnóstico.

A deteção responde à questão “Há dano?”, através da comparação de um indicador sensível ao dano com uma determinada norma ou referência, e é feita através de medições periódicas não destrutivas que obtêm informação sobre a condição das máquinas. Os meios técnicos necessários para fazer a deteção são reduzidos, simples, fáceis de implementar, o pessoal operador não necessita de formação especializada e o computador aciona os devidos alarmes [18].

São indicadores sensíveis ao dano o nível global, o sinal no tempo e o espectro de frequência. O nível global é um indicador escalar, referenciado em normas, como é o caso

---

<sup>2</sup> Retirado de [17]

do valor RMS (*Root Mean Square*) e o valor de pico. O valor RMS basicamente é uma média da amplitude de vibração em função do tempo.

O valor de pico é a amplitude máxima do sinal, enquanto que o sinal no tempo e o espectro de frequência são indicadores vetoriais [18].

O diagnóstico baseia-se na interpretação do padrão do indicador e responde às questões [18]:

- Onde? (Localização)
- Que tipo? (Classificação)
- Qual a gravidade? (Quantificação)
- Quanto tempo? (Previsão)

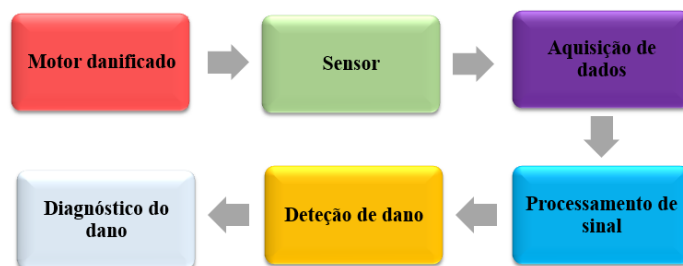
Necessitando de conhecimento especializado, experiência do especialista na interpretação dos dados, meios técnicos alargados, técnicas sofisticadas, medições complementares às da deteção e acesso ao histórico de manutenção do sistema.

Basicamente, o diagnóstico interpreta os sinais no tempo e os espectros de frequência, procurando os sintomas de danos suspeitos [18]. No caso dos motores elétricos de indução procuram-se os sintomas dos danos referidos no capítulo 5.

O diagnóstico é uma fase crítica e de especial atenção na identificação do dano. Efetuado o diagnóstico, é necessário encontrar uma solução para a reposição dos parâmetros normais de funcionamento do equipamento. Um diagnóstico errado pode levar à realização de ações de manutenção não apropriadas que acabam por agravar o estado da máquina ou até mesmo suscitar novos problemas.

O controlo de condição não implica o conhecimento de uma lei de degradação do equipamento, mas implica a existência de um período inicial de vigilância mais apertada para caracterizar especificamente o equipamento e determinar os limiares de degradação admissíveis.

Sistemas de aquisição e processamento de sinal são parte integrante do controlo de condição.



**Figura 3 Funcionamento básico de um sistema de controle de condição**

Estes sistemas adquirem dados de forma contínua (*online*), ou periódica (*offline*), posteriormente processados de modo a avaliar a integridade da máquina durante a sua operação, tornando-se possível identificar falhas mesmo quando estas estão em desenvolvimento. Nestes sistemas podem ser definidos alarmes (Figura 2) passíveis de serem acionados quando determinados parâmetros atingem determinados valores. Estes alarmes antecipados são desejáveis, pois permitem que exista uma maior liberdade para a programação de ações de manutenção e interrupções mais convenientes, resultando em menor tempo de inatividade e menores perdas de capital [19]. Os alarmes podem ser de alerta, caso os valores medidos sofram alterações significantes, e de perigo, caso estes sofram alterações sérias e atinjam valores em que seja recomendado a paragem imediata da máquina, sob pena de se gerarem consequências mais nefastas. Estes alarmes são programados com base nas diferentes normas existentes e na variação do sinal no tempo e espectro de frequência de referência.

O controlo de condição não assegura só o estado de saúde do próprio bem, mas também de todo o processo do qual ele faz parte. Evita trabalhos não programados, ajuda a encomenda atempada de sobresselentes, a gestão mais eficaz do pessoal, otimiza e reduz os custos dos planos de manutenção, aumenta a disponibilidade do bem, diminui a probabilidade de falha catastrófica e aumenta a segurança do pessoal, do material e de todo o processo. Por estes motivos deve ser aplicado a máquinas de grande custo, que estejam associadas a processos críticos, que sejam vitais para a instalação e sejam suscetíveis de criar grandes prejuízos caso falhem.

### 3.1. Aquisição e processamento de sinal

A aquisição de sinal é o processo de aquisição e armazenamento de dados de um fenómeno elétrico ou físico através do uso de um computador [20]. Pode ser entendido como a transformação de um sinal analógico real, contínuo no tempo, em um sinal discreto através da sua amostragem. Isto é, a um sinal contínuo no tempo são retirados um conjunto de pontos, a uma determinada frequência, com o objetivo de obter uma representação mais aproximada possível do sinal real.

Existem vários sistemas de aquisição de sinal, dependendo a sua escolha do tipo de grandeza medida e do objetivo da medição. Contudo, todos eles têm em comum na sua constituição a existência de sensores, hardware de aquisição e medição de dados e um computador com software programável. Um sistema de aquisição de sinal básico (Figura 5) genericamente é constituído por [20]:

- Sensores, que convertem um fenómeno físico em um sinal elétrico mensurável;
- O condicionador de sinal, que converte o sinal analógico elétrico, proveniente do sensor, num sinal capaz de ser lido pelo conversor Analógico/Digital (A/D). Este poderá ser parte integrante da placa de aquisição de dados;
- A placa de aquisição de dados, que adquire um determinado número de amostras de um sinal interagindo com o computador;
- O conversor A/D, que codifica o sinal analógico numa sequência de *bits*, ou seja, num sinal digital capaz de ser lido pelo computador. Este é parte integrante da placa de aquisição de dados;
- Um computador com software programável, capaz de controlar e operar o dispositivo de aquisição e de ser utilizado para o processamento, visualização e armazenamento de dados medidos.

Um sinal analógico contínuo no tempo contém uma infinidade de valores. Devido a limitações tecnológicas é impossível adquirir a totalidade do sinal, sendo apenas possível adquirir uma amostra do mesmo. Isto é, durante um determinado período de

tempo  $T$ , denominado período de amostragem<sup>3</sup>, são adquiridos um determinado número de pontos  $N$ , através da placa de aquisição, daquele que é o sinal analógico elétrico fornecido pelo sensor. Ao número total de pontos  $N$  adquiridos durante o período de amostragem  $T$  é dado o nome de frequência de amostragem,  $f_a$ .

$$f_a = \frac{N}{T} \quad \text{Eq. 1}$$

É intuitivo que quanto maior for a frequência de amostragem mais fielmente se consegue reproduzir um sinal. No entanto, aumentar o valor de  $f_a$  ao máximo poderá não trazer nenhuma vantagem à aquisição de um sinal, podendo até tornar o processo de aquisição mais lento. Deve-se selecionar uma frequência de amostragem adequada à aplicação específica e às características do sensor utilizado.

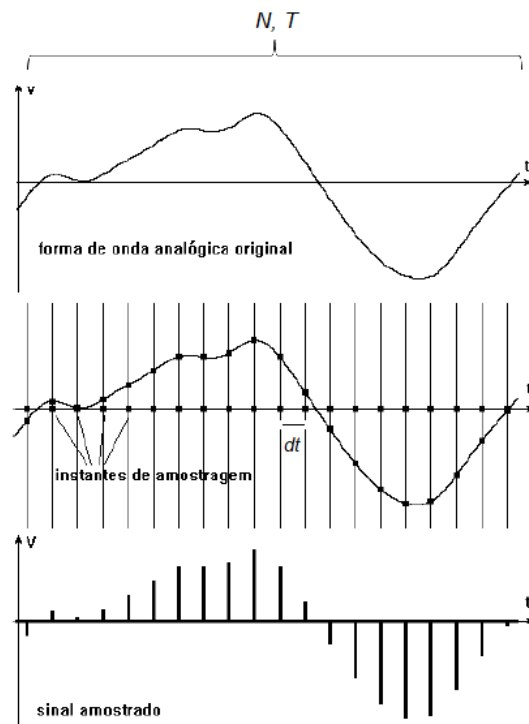
A placa de aquisição não adquire pontos em contínuo. Ao tempo que decorre entre a aquisição de um ponto até a aquisição de outro é dado o nome de resolução no tempo,  $dt$ .

$$dt = \frac{T}{N} \quad \text{Eq. 2}$$

A Figura 4 ilustra o princípio da amostragem.

---

<sup>3</sup> A operação de amostragem gera um sinal de tempo discreto a partir de um sinal de tempo contínuo [24].



**Figura 4 Amostragem de um sinal analógico real <sup>4</sup>**

Os dados adquiridos devem ser consistentes e livres de ruído, sob pena de se virem a revelar inúteis numa fase posterior de processamento [19].

O processamento de sinal é o nome dado aos procedimentos aplicados aos dados adquiridos, de modo a revelar a informação contida nestes. Estes procedimentos dependem essencialmente de várias transformações matemáticas implementadas através de técnicas digitais [21]. Exemplo de um procedimento de processamento de sinal é a aplicação da Transformada de Fourier, a fim de transformar um sinal no domínio do tempo em um sinal no domínio da frequência, isto aplicado na análise em frequência.

No controlo de condição, o processamento de sinal é a parte da atividade de monitorização em que os sinais recolhidos são trabalhados e transformados até ao ponto de poderem ser utilizados para a realização de um diagnóstico [19] e planeamento de ações corretivas.

---

<sup>4</sup> Retirado de [52]





**Figura 5 Exemplo de sistema de aquisição e processamento de sinal**

Quando se adquire um sinal deve-se possuir um conhecimento prévio daquilo que se pretende adquirir. Conhecer o quão rápido o sinal varia com o tempo e quais as frequências presentes no mesmo facilita bastante o processo de aquisição e processamento de sinal, principalmente no controlo de condição de máquinas.

A longo prazo, a existência de sistemas de aquisição e processamento de dados facilita a existência de bases de dados sólidas capazes de serem utilizadas na realização de análise de tendência, permitindo prever o momento de falha da máquina. Desta forma, consegue-se obter um panorama do estado de evolução de determinado dano e efetuar melhorias nos planos de manutenção [19].

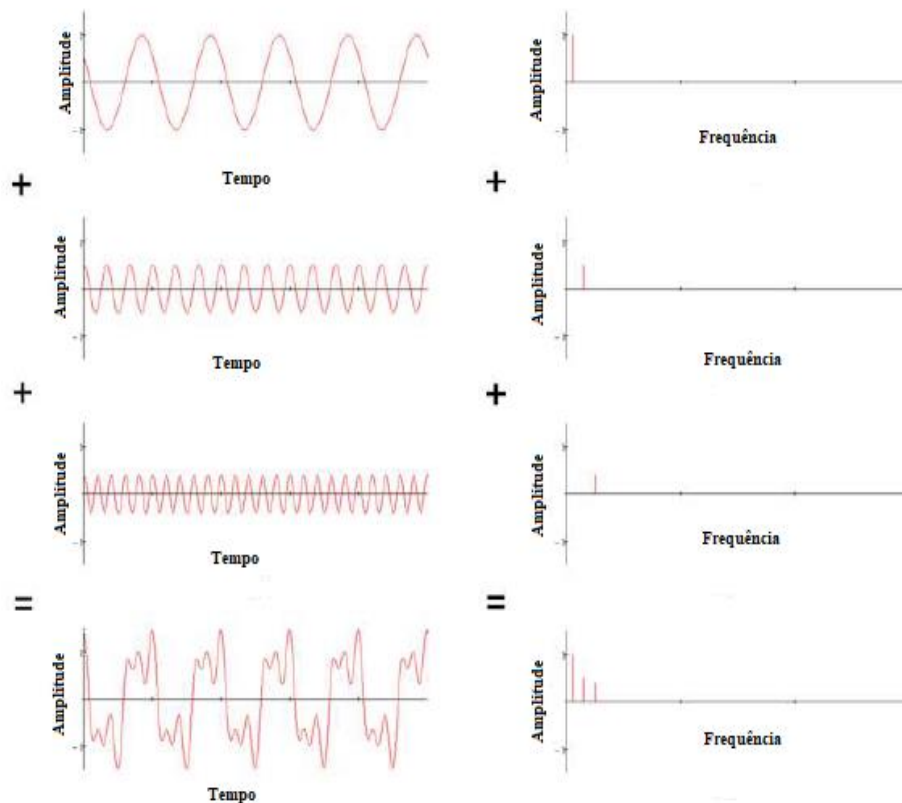
### **3.1.1. Análise em frequência**

Na aquisição de sinal de uma máquina, o sinal no tempo representa a sequência de eventos reais presentes na mesma. No entanto, estes sinais podem ser bastante complexos e difíceis de interpretar. Nestes casos, a análise em frequência permite dissecar detalhadamente o sinal no tempo e revelar a informação contida neste [1].

A análise em frequência transforma um sinal no domínio do tempo em um sinal no domínio da frequência [19] e tem como objetivo identificar diretamente as várias harmónicas que compõem um sinal [22]. Deste modo, é possível conhecer quais as frequências com maior amplitude (logo as mais importantes) presentes no sinal em análise. Esta transformação é efetuada recorrendo-se à aplicação da Transformada de Fourier.

A Transformada de Fourier demonstrou que qualquer função pode ser decomposta numa soma de funções harmónicas de diferentes frequências (Figura 6). No

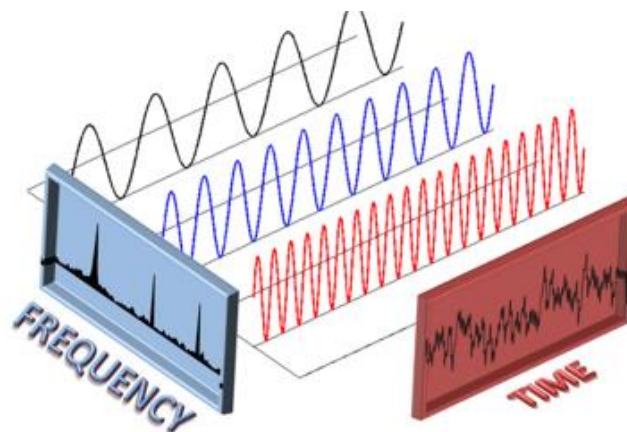
processamento de sinal, e em concreto na análise em frequência, aplica-se a DFT (Transformada Discreta de Fourier). A DFT direta permite identificar as harmónicas, ou seja, as respetivas amplitudes, frequências e fases, que somadas sintetizam o sinal no tempo, ao passo que DFT inversa permite identificar as amplitudes instantâneas do sinal no tempo cuja decomposição são as harmónicas em análise [18].



**Figura 6 Sinal no tempo (à esquerda) versus Sinal em frequência (à direita) <sup>5</sup>**

A FFT (*Fast Fourier Transform*) é um algoritmo informático da DFT, presente em biblioteca na esmagadora maioria dos softwares, que permite apresentar um sinal no domínio da frequência, extraíndo-o de um sinal no domínio do tempo, de um modo mais eficiente e rápido (Figura 7) tornando o processamento de sinal em “tempo real” possível.

<sup>5</sup> Retirado de [18]



**Figura 7** Correlação do sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência <sup>6</sup>

No caso das máquinas a situação mais comum é encontrar sinais periódicos devido à natureza cíclica do seu funcionamento [18]. Por este motivo é que a FFT assume uma grande aplicabilidade no processamento de sinal e no controlo de condição de máquinas rotativas.

Semelhante ao que acontece no domínio do tempo, também no domínio da frequência se define um valor denominado de resolução em frequência  $df$ , que varia em função do período de amostragem.

$$df = \frac{1}{T} \quad \text{Eq. 3}$$

Este valor indica o intervalo de frequências que conseguem ser identificadas em um espectro. Por exemplo, um sinal com um período de amostragem de 1 s apresenta um valor  $df$  de 1 Hz, sendo possível identificar frequências como 1 Hz e 2 Hz, mas não conseguindo identificar com clareza frequências como 1,334 Hz, podendo levar isto a acumulação de determinados erros, nomeadamente o erro de *Leakage*.

Sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência complementam-se e são formas distintas de olhar para os mesmos dados. Um sinal no tempo possibilita analisar a forma de onda, retirar valores de níveis globais, observar condições instáveis, impulsos

---

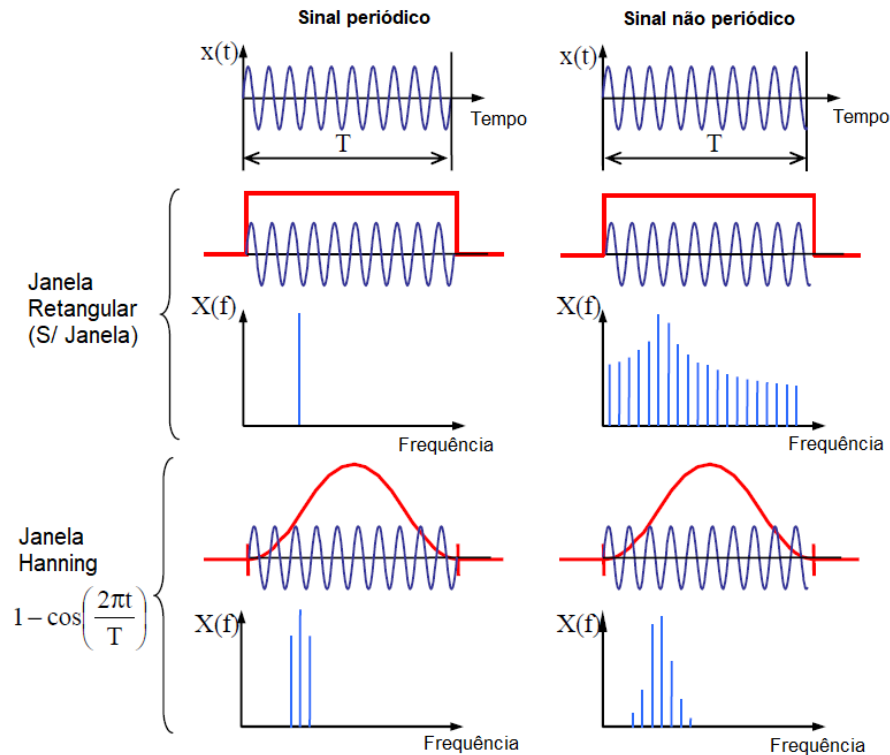
<sup>6</sup> Retirado de <http://ensus.com.br/analise-de-vibracao-tipos-de-sinais-transformada-de-fourier-e-psd/> (última consulta a 20 de outubro de 2018)

transitórios curtos, batidas e vibrações que não são síncronas com a velocidade de eixo. Danos discretos, como na pista de um rolamento, podem ser detetados com relativa facilidade [23] através do sinal no tempo, enquanto um sinal em frequência, devido à sua interpretação direta e simples, permite aferir as frequências presentes no sinal e as respectivas amplitudes.

### **3.1.2. *Leakage***

A FFT assume os sinais como periódicos. No entanto, os sinais adquiridos muitas vezes não possuem exatamente uma forma periódica [22], devido à forma do próprio sinal ou à discordância entre o período do sinal e o período de amostragem, gerando-se uma distorção do sinal adquirido. A isto chama-se erro de *Leakage*. Este é evitado ajustando-se o sinal original e processando-o através da utilização de janelas com forma apropriada.

A Figura 8 é ilustrativa do princípio do erro de *Leakage* e da aplicação de uma janela adequada para a sua supressão.



**Figura 8 Princípio do *Leakage* e a aplicação de janelas <sup>7</sup>**

Se o sinal processado pela FFT for periódico não há necessidade de aplicar qualquer janela (o mesmo que aplicar uma janela retangular). Caso o sinal não seja periódico a FFT tenta modelar as descontinuidades por meio de muitas outras ondas sinusoidais, resultando isto em um espectro de frequência com várias frequências de amplitude reduzida além da frequência correspondente do sinal. A solução para este problema é a aplicação de uma janela, como a janela *Hanning*, que elimina o sinal nas suas extremidades removendo as descontinuidades e aproximando-o de um sinal periódico. As janelas Retangular e *Hanning* são as mais comuns. Contudo, existem muitas outras, cada uma correspondendo a um propósito específico.

Este fenómeno está exemplificado na Figura 8. No caso em que o sinal é periódico, a aplicação de uma janela *Hanning* piorou o seu espectro de frequência, mas no caso em que não se verifica a periodicidade do sinal verificam-se melhorias consideráveis. Daqui advém a importância da visualização do sinal no tempo e da verificação da sua periodicidade como ajuda à escolha da janela correta a utilizar.

<sup>7</sup> Retirado de [22]

### 3.1.3. Aliasing

*Aliasing* é o erro que ocorre quando a frequência de amostragem é muito pequena para capturar realisticamente um sinal [22]. O *Aliasing* traduz-se na existência de uma componente de alta frequência que assume a identidade de uma componente de baixa frequência, distorcendo o espectro do sinal original [24] e criando uma mistura indistinguível entre os componentes reais de baixa frequência (Figura 9).

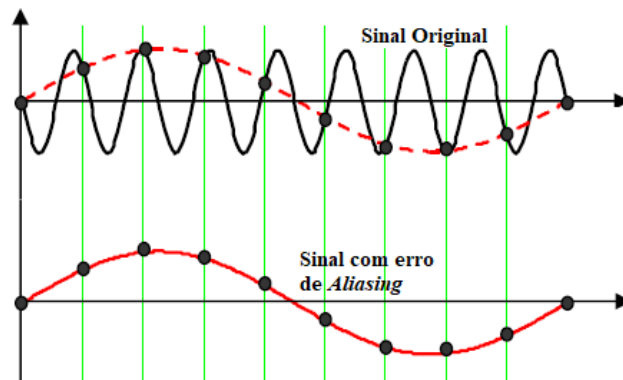


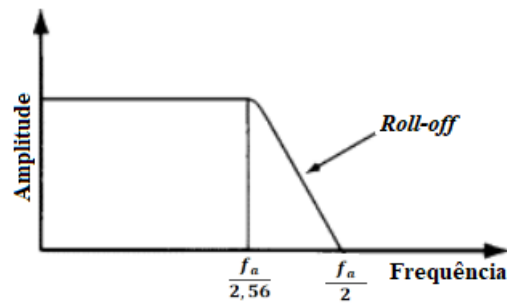
Figura 9 Princípio do Aliasing <sup>8</sup>

O *Aliasing* pode ser evitado recorrendo-se à utilização de um filtro *anti-aliasing* (filtro passa-baixa) antes da amostragem, de modo a atenuar componentes de alta frequência que se encontrem fora da faixa de interesse [24] e à utilização de uma frequência de amostragem apropriada.

Um filtro *anti-aliasing* remove as altas frequências acima da metade da frequência de amostragem do sinal original. Contudo, devido aos filtros *anti-aliasing* e ao fenómeno de *roll-off* (Figura 10) presente nos mesmos só podem ser identificadas com clareza frequências até ao valor de  $\frac{f_a}{2,56}$ . No intervalo  $[\frac{f_a}{2,56} ; \frac{f_a}{2}]$  as frequências sofrem uma redução parcial das suas amplitudes, não sendo viáveis para diagnóstico e por isso desprezadas.

---

<sup>8</sup> Retirado de [22]



**Figura 10** Típico filtro *anti-aliasing* com efeito *roll-off*

De acordo com o Teorema de *Nyquist* (Teorema da Amostragem) a frequência de amostragem,  $f_a$ , deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que este possa ser representado integralmente sem erro de *aliasing* [21]. A esta frequência é dado o nome de frequência de *Nyquist* (Eq. 4) correspondendo à máxima frequência capaz de ser identificada no sinal.

$$f_N = \frac{f_a}{2} \quad \text{Eq. 4}$$

### 3.2. Normas

A descoberta de determinadas assinaturas através dos mais diversos métodos de controlo de condição nem sempre são indicativos da necessidade imediata de intervenção, pois existem sempre pequenas anomalias nas máquinas. O que define esta necessidade e indica a partir de que momento é que estas assinaturas são um problema são as diversas normas existentes.

A norma NP EN 45020 [25] define a normalização como a atividade destinada a estabelecer, face a problemas reais ou potenciais, disposições para utilização comum e repetida, tendo em vista a obtenção do grau ótimo de ordem, num determinado contexto. Consiste, de um modo particular, na formulação, edição e implementação de normas, isto é, documentos estabelecidos por consenso e aprovados por um organismo reconhecido, que define regras, linhas de orientação ou características para atividades e seus resultados. Estas deverão ser fundamentadas com conhecimento científico, técnico e experiência, visando a otimização de benefícios para a comunidade, no respetivo contexto da sua aplicação [25].

São exemplo de normas aplicadas ao controlo de condição de motores elétricos e alusivas ao tema da presente dissertação as seguintes:

- ISO 281 – *Rolling bearings - Dynamic load ratings and rating life*;
- ISO 7919 – *Mechanical Vibrations. Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts*;
- ISO 10816 – *Mechanical Vibrations. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*;
- ISO 18434 – *Thermography. General procedures*;
- ISO 18436 – *Condition monitoring and diagnostics of machines. Requirements for qualification and assesement of personnel*;
- ISO 21940 – *Mechanical vibration. Rotor balancing – Procedures and tolerances for rotors with rigid behaviour*;
- DNV - GL – *Rules for classification of ships*;
- NP EN 13306 2007 – Terminologia da manutenção.

Cada sociedade classificadora emana as suas normas utilizando diferentes critérios e agrupando os diferentes tipos de máquinas de forma distinta. A ISO 10816 apresenta critérios de avaliação que variam com o tipo de máquina, com a constituição da mesma e com a sua operação. Dividindo as máquinas por classes e zonas [26].

As classes dizem respeito ao tipo de máquina avaliada.

- Classe I – Motores elétricos até 15 kW.
- Classe II – Motores elétricos de 15 kW até 75 kW.
- Classe III – Grandes motores principais com massas rotativas.
- Classe IV – Turbinas a gás com saídas superiores a 10 MW.

E as zonas à classificação destas máquinas conforme o seu valor de vibração, em velocidade RMS.

- Zona A – Um nível de vibração bom. Típico de máquinas novas.
- Zona B – Máquinas com um nível de vibração aceitável para um longo prazo de operação.



- Zona C – Máquinas com um nível de vibração insatisfatório para um longo período de operação. Devendo operar por um período de tempo limitado, até oportunidade de realizar a devida ação de manutenção.
- Zona D – Valores de vibração inaceitáveis, capazes de causar danos maiores na máquina.

As normas ISO adotaram o valor RMS como valor padrão devido à importância que este valor atribui às várias harmônicas presentes em um sinal, satisfatório para sistemas em estado estacionário.

Velocidade RMS mm/s	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

**Figura 11 Limites de vibração ISO 10816 <sup>9</sup>**

Já a DNV-GL (*Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd*) baseia-se na observação de um determinado valor de pico para uma determinada banda de frequências, que varia conforme o tipo de máquina em avaliação. No caso dos motores elétricos estipula-se a amplitude de pico de 5 mm/s para uma banda de frequência de 2 Hz a 100 Hz [27]. Contudo, o valor de pico não é um valor estatístico e por isso pode não ser confiável na detecção de anomalias em sistemas operacionais contínuos [23].

Num mundo complexo, o estabelecimento de padrões através da normalização tem como vantagens a compatibilidade, interoperabilidade, aumento da eficiência, redução de custos, diminuição de erros e garantia de segurança dos produtos, equipamentos e sistemas. É nesta medida que não é possível desassociar o controle de condição da normalização.

---

<sup>9</sup> Retirado de [26]

### **3.3. Métodos de controlo de condição mais comuns em motores elétricos de indução**

Existem diversos métodos de controlo de condição aplicados em motores elétricos de indução, tais como: [3], [28]

- Análise de vibrações;
- Análise de corrente;
- Análise termográfica;
- Análise de tensão induzida;
- Análise acústica;
- Análise química;
- Análise de torque;
- Análise da órbita do veio;
- Inspeção visual;
- Monitorização de flutuações de velocidade;
- Monitorização do pulso de choque (essencialmente para rolamentos);
- Controlo instantâneo da potência do estator.

Na presente dissertação são apenas estudados a análise de vibrações, a análise de corrente e a análise termográfica.

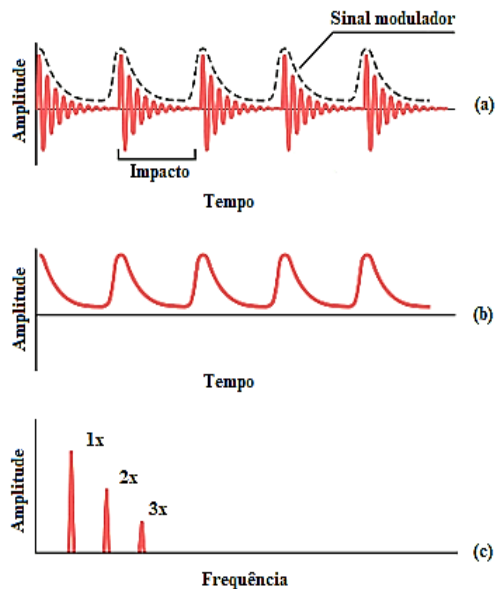
#### **3.3.1. Análise de vibrações**

A análise de vibrações é um dos métodos mais conhecidos e utilizado no controlo de condição de máquinas rotativas. Reage rapidamente à mudança de estímulo, o que é ótimo para ser utilizada em sistemas de monitorização permanente, e apresenta grande probabilidade de acertar no diagnóstico do componente danificado [16]. É provavelmente o melhor método para detetar anomalias que envolvam a aplicação dinâmica de forças aos mais variados componentes de uma máquina, como desequilíbrio, falha nos rolamentos e engrenagens, perdendo as suas vantagens à medida que se apresentam danos que originam uma maior complexidade de movimentos, como é o caso do desalinhamento, folgas e desapertos [29].

A sua metodologia baseia-se essencialmente na comparação de dois estados da máquina: antes e depois da existência de dano. Uma máquina saudável apresenta uma assinatura de vibração própria que se altera devido à existência de excitações internas criadas pelo desenvolvimento de um dano. A alteração desta assinatura é tal que pode ser relacionada com o dano existente [16].

A análise de vibrações é versátil, uma vez que o sinal no tempo fornece uma imagem do movimento assumido pela máquina, a análise em frequência permite verificar as harmónicas de maior influência presentes no sinal e a análise de fase ter uma ideia do movimento relativo entre os componentes da máquina. Existem ainda outras técnicas como a técnica do envelope, muito utilizada para diagnosticar anomalias em rolamentos, a técnica *cepstrum* para danos em engrenagens e o teste do impacto para identificação de frequências naturais.

A técnica do envelope, especialmente importante nesta dissertação por ser a técnica mais utilizada na análise de defeitos em rolamentos, consiste em filtrar um sinal no tempo complexo com um filtro passa-alta, que é então modulado em amplitude para formar o envelope do sinal, cujo espetro contém a informação desejada e não revelada pelo espetro padrão [16].



**Figura 12 Técnica do envelope - (a) Sinal no tempo de um rolamento defeituoso (b) Sinal modulado (c) Espectro de frequência do sinal modulado <sup>10</sup>**

Contudo, as técnicas de análise mais comuns são a medição de valores globais (deteção) e a análise em frequência (diagnóstico).

Os valores globais são maioritariamente extraídos do sinal no tempo, como é o caso de valores RMS e valores de pico, e estabelecidos por normas como a ISO 10816 que apresenta os princípios básicos recomendados para medir e avaliar a vibração de acordo com o tipo de máquina em questão [22].

A análise em frequência utiliza o espectro da máquina em boas condições como referência para deteção e diagnóstico. Sensores, colocados na parte externa do motor, captam um sinal de vibração no domínio do tempo que, através da FFT, rapidamente passa para o domínio em frequência. Estes espectros são analisados em bandas específicas, relacionando-se a amplitude de determinadas frequências com problemas específicos da máquina [29], [30].

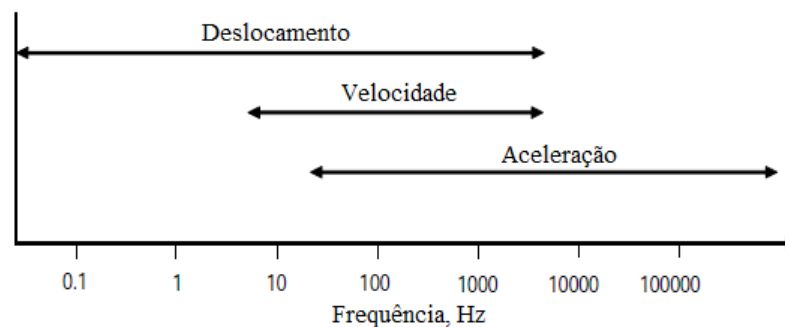
Como se verá adiante, muitos dos danos apresentam sintomas de vibração semelhantes. Para se efetuar um correto diagnóstico é necessário ter em conta o plano dominante de vibração, as frequências presentes, que indicam o tipo de dano e qual o

<sup>10</sup> Retirado de <https://power-mi.com/content/demodulation-or-envelope-analysis> (última consulta a 26 de fevereiro de 2019)

componente danificado, a amplitude, que indica a gravidade do dano, e a fase, que permite distinguir entre danos com sintomas semelhantes [31].

Com base no conteúdo espectral procurado, a análise de vibrações, pode ser efetuada atendendo aos seguintes parâmetros de vibração:

- Deslocamento – Significante a baixas frequências;
- Velocidade – Significante para valores de frequência intermédios, sendo dado o mesmo peso às baixas e altas frequências;
- Aceleração – Significante a altas frequências, tendendo a enfatizar em demasia a maior parte do conteúdo espectral. Por este motivo pode causar um falso alarme.



**Figura 13 Faixas de frequência na medição de vibração <sup>11</sup>**

E a escala de amplitudes pode ser linear, realçando as maiores amplitudes no espectro ou logarítmica, permitindo tanto a visualização das menores amplitudes como das maiores num mesmo gráfico.

As medições são realizadas direccionalmente, isto é, radial ou axialmente, e os sensores são normalmente colocados em pontos estruturais que respondem significativamente às forças dinâmicas que caracterizam a vibração do motor, como a extremidade do veio, caixa de rolamentos e chumaceiras. No entanto, só devem ser efetuadas medições após a máquina atingir a sua condição normal de funcionamento, evitando momentos transientes de vibração que levem a um diagnóstico errado [26].

Recomenda-se que sejam efetuadas inspeções e registos periódicos com uma frequência de 2 a 3 meses, mais uma inspeção detalhada após a realização de uma ação

---

<sup>11</sup> Retirado de [19]

de manutenção ou serviço maior. Estas inspeções devem culminar na elaboração de um relatório onde constem as frequências e amplitudes de vibração registadas, sendo frequências de interesse as frequências de rotação, de alimentação e múltiplas destas [32]. Os danos surgem de modo progressivo, aumentando a amplitude de vibração de forma gradual, o que justifica a análise de tendência.

Apesar deste método ser dos mais utilizados no controlo de condição, continuam a existir casos em que este não alerta atempadamente da falha de determinados componentes, sendo este fator justificado pelo treino inadequado e necessário dos operadores e analistas de vibrações [29].

### **3.3.2. Análise de corrente**

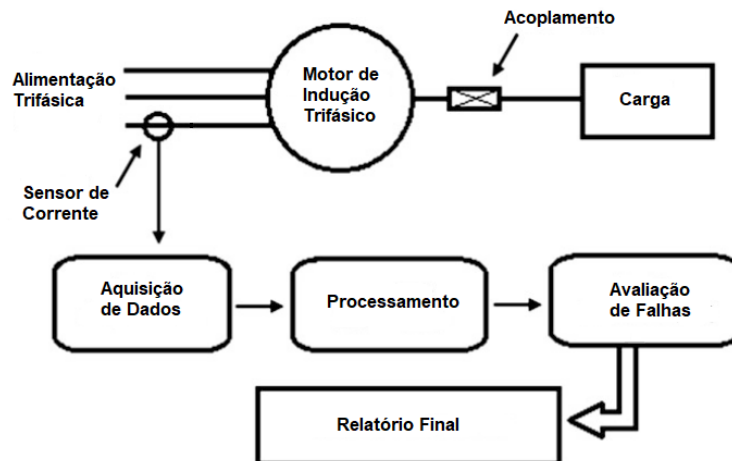
A análise de corrente ou MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) é bastante comum na deteção e diagnóstico de danos e avarias em motores elétricos. Este método baseia-se na análise espectral das correntes absorvidas pelo estator procurando-se analisar as bandas laterais em torno da frequência de alimentação [8]. Tanto problemas mecânicos como elétricos podem ser detetados através da aplicação deste método.

A análise de corrente é um método bastante simples de compreender, de aplicar, não invasivo, eficiente e económico, muitas vezes presente em sistemas de monitorização *online* no controlo de condição de máquinas. Contudo é, ao mesmo tempo, sensível, uma vez que fatores inesperados podem induzir frequências ambíguas, que afetarão o julgamento das harmónicas anormais [8], como é o caso da carga a que o motor está sujeito.

Este método está dependente da amostragem da corrente do estator e da aplicação da FFT. A corrente deve ser amostrada somente após o motor atingir o estado estacionário, uma vez que a variação de carga pode resultar em flutuações no espectro de frequência que levam a diagnósticos errados e difíceis interpretações do sinal [8].

A aplicação deste método assenta em três passos fundamentais (Figura 14) [28]:

1. Aquisição de dados;
2. Processamento de dados;
3. Avaliação de falhas.



**Figura 14 Técnica de análise de corrente para detecção e diagnóstico de dano** <sup>12</sup>

A aquisição de dados é a etapa em que, com recurso a um sensor de corrente, se adquire o sinal de corrente da alimentação do estator do motor elétrico. Geralmente, é adquirido o sinal de uma única fase, mas para maior precisão, podem ser obtidos os sinais das três fases. Estes sinais podem ser pré-processados através de filtros para remoção de componentes indesejadas.

No processamento são utilizadas várias ferramentas, como é o caso da FFT e da inteligência artificial, de onde se extraem um conjunto de frequências específicas geradas devido a danos próprios.

Após serem detetadas determinadas frequências no processamento do sinal adquirido é feita uma avaliação da falha existente, identificando-se o dano em questão e qual a sua gravidade, normalmente por comparação com espectros de frequência de referência [8], [33], chamados de padrões de assinatura de corrente [34]. Esta fase exige um conhecimento preciso do motor em análise e do seu espectro, quando saudável.

---

<sup>12</sup> Retirado de [28]

A maior parte dos espectros existentes na análise de corrente apresenta uma escala de amplitude logarítmica devido à necessidade de realçar determinadas frequências que possuem uma amplitude muito reduzida, próprias de determinado tipo de dano.

À semelhança de outros métodos a análise deve culminar com a produção de um relatório onde conste toda a informação alusiva às condições em que a análise foi efetuada e quais as conclusões retiradas face à comparação de espectros atuais com padrões ou análises passadas.

As análises devem ser efetuadas sempre referentes a uma determinada velocidade e carga do motor, uma vez que os sinais de corrente se alteram com base nestas condições e só é possível efetuar uma comparação se esta for referente a um mesmo padrão de funcionamento.

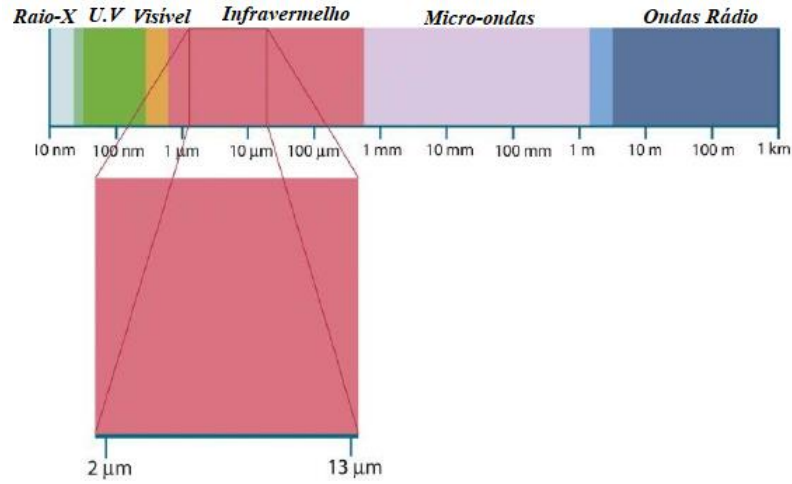
### **3.3.3. Análise termográfica**

Todos os corpos acima do zero absoluto emitem radiação térmica, consistindo esta no transporte de energia por meio de ondas eletromagnéticas e caracterizando-se pela sua frequência  $f$ , e comprimento de onda  $\lambda$ , como mostra a Eq. 5 onde  $c$  é a velocidade de propagação da luz no meio [35].

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Eq. 5}$$

A radiação infravermelha é a radiação de interesse para a análise termográfica, estando definida no espectro eletromagnético (Figura 15) por comprimentos de onda de  $0,75 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$  [35].





**Figura 15** Espectro eletromagnético <sup>13</sup>

A análise termográfica serve-se da capacidade que os corpos têm para armazenar e emitir energia térmica (vibração atômica e molecular).

O corpo negro é um corpo teórico que tem a capacidade de absorver toda a radiação incidente sobre si, independentemente do comprimento de onda e direção, [36] e de emitir a máxima energia térmica correspondente à sua temperatura [35]. Ao corpo negro está associado um valor de emissividade  $\varepsilon = 1$  e no equilíbrio térmico este emite radiação à mesma taxa que a absorve (demonstrado por *Gustav Robert Kirchhoff*) [36].

$$\varepsilon = \frac{\text{Radiação emitida por um corpo à temperatura } T}{\text{Radiação emitida por um corpo negro à temperatura } T} \quad \text{Eq. 6}$$

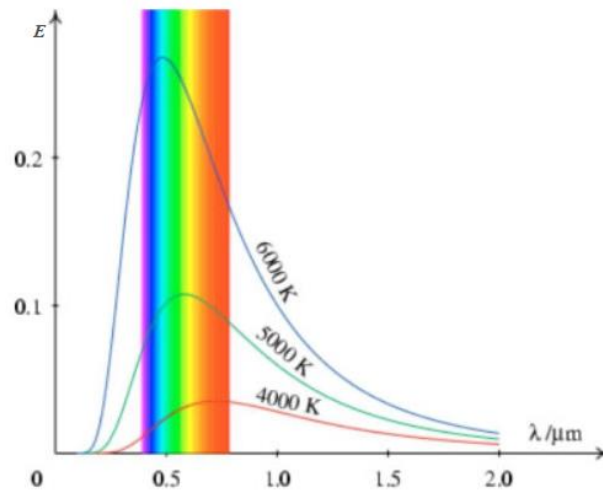
A energia emitida por este corpo a uma dada temperatura, para cada comprimento de onda, é traduzida pela Lei de *Planck* [36] como

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \left[ \frac{Wm^2}{\mu m} \right] \quad \text{Eq. 7}$$

Sendo  $\lambda$  o comprimento de onda, em  $\mu m$ ,  $T$  a temperatura absoluta do corpo negro, em  $K$ ,  $C_1 = 3,74177 \times 10^8 \left[ \frac{W\mu m^4}{m^2} \right]$  e  $C_2 = 1,43878 \times 10^4 [\mu mK]$ .

<sup>13</sup> Retirado de [36]

A Eq. 7 graficamente produz uma família de curvas (Figura 16) onde, para cada curva, a energia emitida é zero quando  $\lambda = 0$ , tendo depois um crescimento acentuado até um valor  $\lambda_{máx}$  coincidente com a máxima energia emitida. Após este valor e para valores de comprimento de onda  $\lambda$  muito elevados a energia emitida tende para zero. À medida que a temperatura do corpo vai diminuindo, os picos das curvas tendem a deslocar-se para valores de comprimento de onda  $\lambda$  superiores e para valores de energia emitida inferiores [36].



**Figura 16 Energia emitida por um corpo negro a várias temperaturas segundo a Lei de Planck**<sup>14</sup>

As máquinas não exibem o comportamento perfeito do corpo negro. Comportam-se como um corpo real que absorve ( $\alpha$ ), transmite ( $\tau$ ) e reflete ( $\rho$ ) parte da radiação incidente acabando por possuir valores de emissividade inferiores à unidade,  $\varepsilon < 1$  [35]. Para qualquer comprimento de onda o corpo real apresenta a relação [36]

$$\alpha(\lambda) + \tau(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad \text{Eq. 8}$$

Contudo, *Kirchhoff* enuncia que um corpo exposto a uma determinada temperatura e comprimento de onda apresenta valores de emissividade  $\varepsilon$  iguais aos valores de absorção  $\alpha$  [36].

<sup>14</sup> Retirado de [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-11172011000100015](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000100015) (última consulta a 5 de janeiro de 2019)

$$\varepsilon(\lambda) + \tau(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad \text{Eq. 9}$$

Como a transmissão de energia não desempenha um papel prático, a Eq. 9 pode ser simplificada [37].

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1 \quad \text{Eq. 10}$$

A variação de temperatura de uma máquina, especialmente o aumento, geralmente associa-se à existência de dano. Desta forma, a monitorização da temperatura de um motor elétrico pode ser importante no controlo de condição.

A análise termográfica serve-se da emissão de radiação infravermelha pelos corpos para criar uma imagem representativa da distribuição de temperaturas na superfície dos mesmos através da utilização de câmaras termográficas e de softwares de processamento e análise de imagem que as acompanham.

A câmara termográfica funciona com base na Lei de *Planck* (Eq. 7), calculando a temperatura de um corpo, relacionando a energia infravermelha medida, numa banda de comprimentos de onda determinada pela sensibilidade do detetor da câmara com a temperatura do corpo negro que radiasse a mesma energia. No entanto, como a emissividade de um corpo real varia, é necessário introduzir o valor da emissividade do objeto na câmara, para que esta possa efetuar as devidas correções e aproximar a temperatura aparente, valor de temperatura fornecido pela câmara, o máximo possível da temperatura verdadeira, temperatura real do corpo [35]. A câmara, além de medir a energia emitida por um objeto, também mede a energia refletida por este [35], sendo também necessário introduzir este valor para que as devidas correções sejam efetuadas.

Os valores de emissividade para os diversos materiais encontram-se em tabelas como a do Anexo A. Mas podem também ser obtidos empiricamente, quando não se conhece o material inspecionado, através da aplicação do método por contacto e do método com material de emissividade de referência [35], [36] explicado no Anexo B.

Também a temperatura da radiação refletida pode ser estimada através de dois métodos distintos [35], o método refletor e o método direto, contemplados na norma ISO 18434 e explicados no Anexo C.

A Eq. 7 mostra que quanto menor o valor de emissividade maior será a quantidade de energia refletida, o que dificulta a obtenção de imagens precisas e amplifica a importância da introdução da temperatura da radiação refletida na câmara. Uma forma prática de reduzir a interferência da radiação refletida é isolar o objeto com uma lona ou caixa de papelão [37]. Caso todas as interferências sejam evitadas a temperatura da radiação refletiva pode ser considerada igual a temperatura ambiente [37].

Quanto maior for a diferença de temperatura entre o meio ambiente e o objeto de medição, mais importante é efetuar o ajuste de emissividade do objeto para diminuição dos erros de medição.

Deve-se seguir as instruções do fabricante no que diz respeito à operação da câmara termográfica e medir de acordo com as suas características, como é o caso do ângulo de visão, da distância de medição apropriada e do tamanho mínimo do objeto a ser medido. Sempre que possível, deve-se procurar efetuar medições em superfícies que não estejam sujas, revestidas ou muito polidas de modo a não influenciar os valores de emissividade introduzidos. Geralmente, para o mesmo material, superfícies irregulares possuem maiores valores de emissividade do que lisas e polidas. Deve-se ao máximo evitar todas as fontes de interferência (radiação refletida) e fluxos de ar, dificultando-se a transmissão de calor por convecção [37].

Para se obter uma boa imagem térmica deve-se:

1. Colocar o objeto alvo na linha de visão da câmara, não podendo existir objetos entre a câmara e o objeto em análise;
2. Utilizar um ponto de medição inferior ao objeto a ser medido;
3. Escolher uma gama de medição adequada;
4. Focar a imagem;
5. Evitar os reflexos mudando de posição;
6. Dar atenção as paletes de cor, à barra de referência e a escala de temperaturas.

Na análise termográfica, os sintomas de dano resumem-se à existência ou ausência de aumento de temperatura em determinados pontos da máquina. É praticamente impossível quantificar o aumento de temperatura e relacioná-lo com um dano existente. As máquinas não são todas feitas do mesmo material e o mesmo dano pode provocar

aumentos de temperatura diferentes em máquinas diferentes, apesar de ser praticamente intuitivo que danos mais graves provocam maiores aumentos de temperatura. A isto chama-se termografia comparativa, técnica explicada na norma ISO 18434, e que pode ser quantitativa, onde se procura encontrar um valor para a diferença de temperatura entre determinado ponto da máquina e a temperatura ambiente, e qualitativa, onde se comparam padrões térmicos entre uma máquina danificada e outra em bom estado.

Cada inspeção deve terminar com a elaboração de um relatório que permita a construção de um historial do equipamento e possua informação como o dia e local da realização da inspeção, encarregado pela inspeção, equipamentos e métodos de inspeção utilizados, condições ambientais e valores adquiridos [35]. Estes relatórios permitem que se adquiram valores de temperatura de referência, que se faça um acompanhamento de condição do equipamento e possibilitam a realização da análise de tendência.

Parte do sucesso da análise termográfica está no operador, que deverá ser experiente, possuidor de conhecimentos na área, conhecedor das capacidades da câmara que opera e dos equipamentos em medição. Só assim é que, perante os resultados obtidos, existirá sentido crítico para distinguir entre um possível dano ou o normal funcionamento do equipamento, bem como a obtenção de imagens termográficas de boa qualidade.

A grande vantagem da análise termográfica é o modo expedito como esta pode ser aplicada, não necessitando de parar o sistema e possibilitando a deteção de dano num período de tempo muito reduzido.

### **3.4. Instrumentação e sensores**

Um sistema de controlo de condição envolve a medição e interpretação de determinados parâmetros, que variam consoante a técnica de análise, tipos de instrumentos e sensores utilizados.

A análise de vibração utiliza analisadores de vibrações profissionais, como o da Figura 17, que realizam registos de forma de onda, geram espetros de frequência, gráficos de tendência e valores globais, consoante as normas definidas.



**Figura 17 Analisador de vibração SKF (à direita) e analisador de vibração portátil com acelerómetro piezoelétrico (à esquerda) <sup>15</sup>**

Estes analisadores por norma possuem várias entradas e são capazes de analisar diferentes sinais provenientes de vários transdutores, podendo estes ser de deslocamento, velocidade e aceleração [22], sendo mais comum a utilização do acelerómetro e do sensor de proximidade. O primeiro mede a aceleração, estática e dinâmica, do sistema e o segundo mede o deslocamento ao detetar a proximidade do objeto [18].



**Figura 18 Sensor de proximidade <sup>16</sup>**

O acelerómetro, essencialmente o piezoelétrico (Figura 17), é o sensor mais utilizado na indústria, acompanhado do sensor de proximidade (Figura 18), utilizado especialmente na monitorização permanente (*online*) de máquinas críticas aos processos de produção [18]. As principais vantagens do acelerómetro prendem-se com os grandes intervalos dinâmicos e de frequência associados a si, além de ser resistente e de fácil instalação [13]. Contudo, apresenta como desvantagens o facto de:

- O sinal de vibração recolhido ser local e poder não representar informação do outro extremo da máquina;
- A análise depender da orientação espacial (X, Y e Z);

<sup>15</sup> Retirado de <https://www.skf.com/pt/products/condition-monitoring/portables-data-collectors-and-analyzers/vibration-analyzers/index.html> e de <http://www.directindustry.fr/prod/adash/product-61171-1763504.html> (última consulta a 24 de fevereiro de 2019)

<sup>16</sup> Retirado de [47]

- A transmissão do sinal poder atenuar componentes características de determinada falha.

A análise de corrente utiliza equipamentos profissionais, como o da Figura 19, constituídos por um computador portátil com software de aquisição, processamento e análise de dados, capaz de aceder ao historial do motor elétrico, adquirir dados em vários canais em simultâneo e disparar alarmes de alerta e perigo caso os valores estejam fora dos critérios aceites.



**Figura 19 Equipamento de análise de corrente em motores elétricos** <sup>17</sup>

Estes equipamentos realizam as suas medições por meio de transformadores e sensores de corrente, como pinças amperimétricas, que permitem obter o sinal AC e medir valores eficazes de corrente.



**Figura 20 Pinça amperimétrica FLUKE (à esquerda) e sensor de corrente Phidgets (à direita)** <sup>18</sup>

A análise termográfica utiliza câmaras termográficas, sensíveis à radiação térmica, que permitem obter um valor de temperatura para cada ponto da superfície de

<sup>17</sup> Retirado de <http://www.pdma.com/PdMA-MCEMAX.php> (última consulta a 23 de fevereiro de 2019)

<sup>18</sup> Retirado de <https://www.tecnoferramentas.com.br/pinca-amperimetrica-capacidade-ac-05-a-400a-ref-2277202-mod-438-ii-fluke-i400s-502779/p> e <https://www.phidgets.com/?tier=3&catid=16&pcid=14&prodid=375> (última consulta a 25 de fevereiro de 2019)

um objeto e assim criar uma imagem bidimensional da distribuição de temperaturas no mesmo.



**Figura 21 Câmara termográfica FLIR E95 <sup>19</sup>**

A maioria destas câmaras são comercializadas juntamente com um software de processamento e tratamento de imagem que ajudam na interpretação e manipulação das imagens térmicas obtidas.

Para além da instrumentação referida, o controlo de condição utiliza muitos outros instrumentos e sensores, como a lâmpada estroboscópica, o sensor fotoelétrico, o transdutor de força e o sensor efeito *Hall*. A escolha do sensor depende do método utilizado, dos parâmetros que se pretende medir e da informação que se pretende obter.



**Figura 22 Sensor fotoelétrico: Emissor e Recetor**

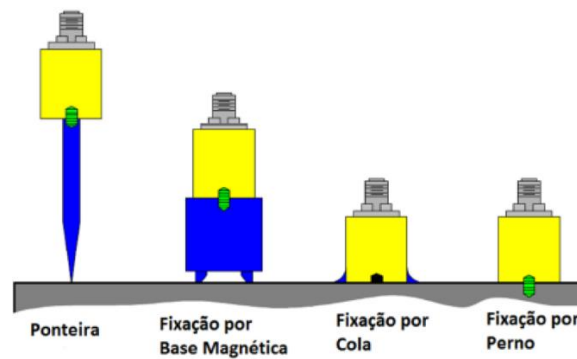
Cada sensor deve ser manuseado e utilizado de acordo com as suas particularidades. A fixação do sensor é um aspeto importante a ser considerado. Um sensor apenas mede aquilo que acontece consigo mesmo. Por este motivo, a fixação do sensor à máquina deve ser tal que este se comporte do mesmo modo que esta. Qualquer acessório de fixação adicionado ao sensor altera a sua capacidade de medida podendo

---

<sup>19</sup> Retirado de <http://www.specman.pt/exx.html> (última consulta a 5 de janeiro de 2019). Câmara termográfica comercializada pela Specman.



degradar completamente os dados medidos ou reduzir a faixa de frequência utilizável do mesmo. Normas como a ISO 5348 explicam como é que a fixação dos sensores deve ser efetuada e quais as consequências de cada método de fixação na capacidade de medida dos mesmos. A utilização de ponteiras, parafusos, fita adesiva e ímanes na fixação de acelerómetros [22] são exemplos de meios de fixação mencionados nas referidas normas.



**Figura 23 Tipos de fixação do acelerómetro** <sup>20</sup>

A tendência atual dos sensores é evoluir de modo a tornarem-se mais sensíveis à variação do fenómeno físico, práticos e cada vez mais económicos. Atualmente todas as placas de aquisição de dados possuem o condicionador de sinal integrado e muitas vezes são dispensáveis, visto que os sensores começam a conseguir medir e adquirir o sinal conectando-se simplesmente ao computador através de uma prática ligação USB.

---

<sup>20</sup> Retirado de [13]



## 4. Motor Elétrico de Indução

O motor elétrico tem como função a transformação de energia elétrica em energia mecânica, fazendo-o com base em leis fundamentais do eletromagnetismo. As perdas de energia presentes no motor elétrico são muito pequenas, possuindo este a vantagem de ser uma máquina com um rendimento elevado o que, aliado à sua robustez, fácil construção, simples princípio de funcionamento e alta fiabilidade, a torna num dos motores mais aplicados na indústria e meio naval.

Os motores elétricos, de um modo geral, são classificados de acordo com o presente na Figura 24, destacando-se unicamente, na presente dissertação, os motores elétricos de indução trifásicos devido à sua enorme aplicação global.

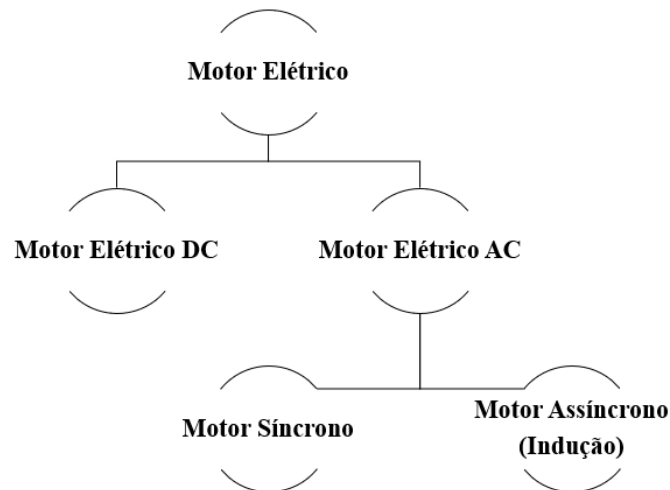
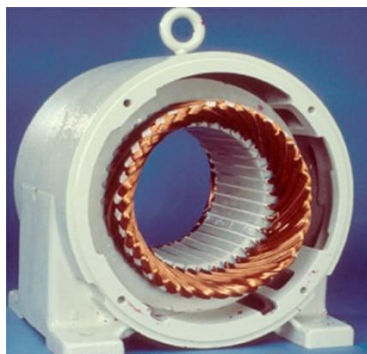


Figura 24 Classificação dos motores elétricos

### 4.1. Constituição

O motor elétrico de indução é constituído essencialmente por dois componentes, o estator e o rotor.

O estator (Figura 25) está alojado na carcaça do motor e constitui uma parte fixa do mesmo onde são colocados os enrolamentos dispostos de forma específica, consoante as especificações do motor.



**Figura 25 Estator de um motor de indução <sup>21</sup>**

O rotor pode ser de dois tipos, rotor em gaiola de esquilo ou rotor bobinado.

O rotor em gaiola de esquilo (Figura 26) é composto por barras condutoras colocadas dentro de pequenas cavas presentes no rotor, ligadas em curto circuito por anéis condutores nas extremidades do mesmo. Possui esta designação devido à sua semelhança às rodas de exercício de um esquilo ou hamster.



**Figura 26 Rotor em gaiola de esquilo <sup>22</sup>**

O rotor bobinado (Figura 27) possui um conjunto trifásico de enrolamentos, que são uma imagem espelhada dos enrolamentos presentes no estator. Os terminais destes estão ligados por um fio a anéis condutores presentes no veio do rotor. Utilizando-se escovas de grafite é possível conduzir a corrente gerada no rotor para o exterior e, através do uso de resistências variáveis, limitar a corrente no arranque e controlar a velocidade de rotação do rotor. Este tipo de rotor não é muito comum, sendo encontrado apenas em determinadas aplicações específicas.

---

<sup>21</sup> Retirado de <http://www.sotofilhos.com.br/biblioteca/Noticias/Causas,%20Danos,%20Queima,%20tipicas%20de%20Falhas%20em%20Enrolamentos%20de%20Motores%20Eltricos%20Trifasicos.html> (última consulta a 18 de outubro de 2018)

<sup>22</sup> Retirado de <https://learningengineering1994.blogspot.com/2017/07/types-of-rotors-different-types-of.html> (última consulta a 20 de outubro de 2018)



**Figura 27 Rotor bobinado** <sup>23</sup>

Entre o estator e o rotor existe um pequeno espaço vazio denominado de entreferro.

Geralmente, tanto o estator como o rotor são constituídos por um material com elevada permeabilidade magnética, laminado e isolado entre si, para permitir que se crie indução com correntes de valor baixo e para evitar perdas por histerese<sup>24</sup> e correntes de *Foucault* - também denominadas correntes de *Eddy*<sup>25</sup>.

Além do estator e do rotor existem outros componentes (Figura 29) como:

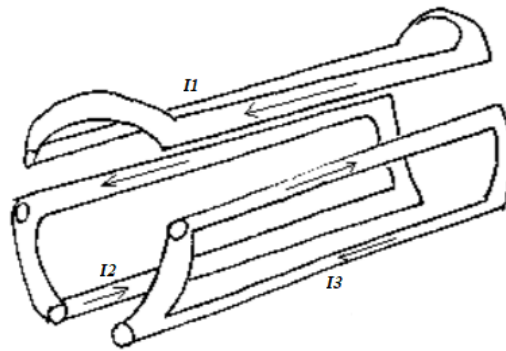
- Os enrolamentos, que são o conjunto de bobinas presentes no estator e no rotor (caso do rotor bobinado). Os enrolamentos são distribuídos a distâncias análogas uns dos outros e cada um cria um campo magnético quando alimentado por uma corrente. Todos juntos criam um campo magnético girante.

---

<sup>23</sup> Retirado de [http://www.obeki.com/noticias.php?apli\\_desde=12](http://www.obeki.com/noticias.php?apli_desde=12) (última consulta a 20 de outubro de 2018)

<sup>24</sup> “Perda por histerese num núcleo de ferro é a energia requerida para realizar a reorientação das partículas ferromagnéticas durante cada ciclo de corrente alternada aplicada ao núcleo.” [38]

<sup>25</sup> Correntes de Eddy são correntes que são induzidas em forma de remoinho em um material condutor, relativamente grande, quando este é sujeito a um fluxo magnético variável. Análogo ao que acontece com um enrolamento em torno de um núcleo.

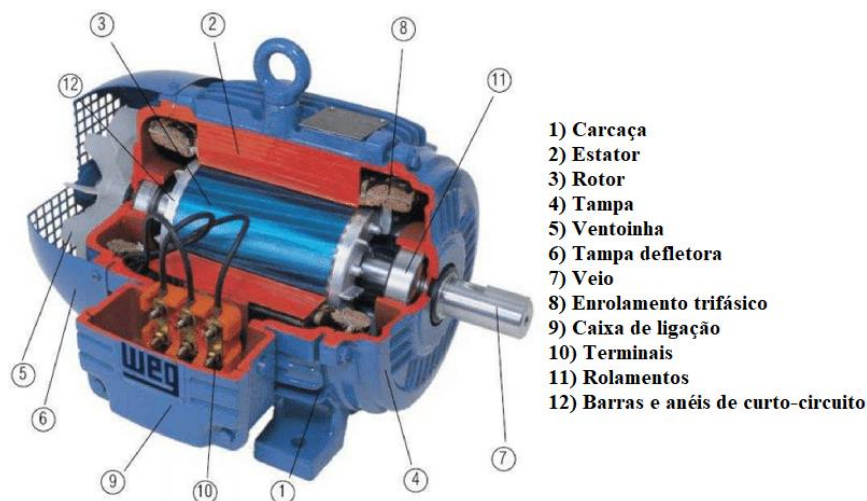


**Figura 28 Enrolamento trifásico** <sup>26</sup>

- Os rolamentos, elemento que permite que o rotor gire sobre si e que, ao mesmo tempo, esteja apoiado na carcaça do motor.
- O veio, estrutura sobre a qual é montado todo o rotor e sistema de ventilação. É feito de um aço resistente, tratado termicamente, para suportar todo o esforço mecânico.
- A caixa de ligação, local onde se efetuam as ligações que alimentam as respectivas fases e, conseqüentemente, o motor.
- A ventoinha, responsável pelo arrefecimento do motor, que aquece devido às perdas de energia existentes.
- A carcaça, que têm uma função puramente mecânica de suporte.
- As tampas, que estão localizadas em cada um dos extremos do motor e que têm também uma função de suporte.

Existem ainda outros componentes de menor importância funcional, como olhais, pinos, placas de identificação e juntas.

<sup>26</sup> Retirado de <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABTGkAB/motores> (última consulta a 20 de setembro de 2018)



**Figura 29 Constituição de um motor de indução <sup>27</sup>**

## **4.2. Princípio de funcionamento**

O motor elétrico de indução trifásico funciona fundamentalmente com base na lei de indução de *Faraday*, na lei de *Lenz*, na lei de *Laplace* e no conceito de campo magnético girante.

A lei de indução de *Farady* enuncia que se existir uma variação de fluxo magnético através de um condutor elétrico, será então induzida neste uma tensão elétrica proporcional à taxa de variação do fluxo [38].

Campo girante é o campo magnético criado pela alimentação dos enrolamentos do estator por uma corrente alternada trifásica. Os enrolamentos no estator, ou fases, estão distribuídos de forma desfasada,  $120^\circ$  uns dos outros (sistema trifásico), e são alimentados por uma corrente alternada trifásica que gera, em cada fase, um campo magnético. O campo girante é o campo magnético resultante da soma dos campos magnéticos das 3 fases, que permanece invariável em magnitude, mas variável em sentido (Figura 30).

<sup>27</sup> Retirado de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Vista-em-corte-de-um-motor-de-inducao-trifasico-Fonte-WEG\\_fig1\\_310502963](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Vista-em-corte-de-um-motor-de-inducao-trifasico-Fonte-WEG_fig1_310502963) (última consulta a 20 de setembro de 2018)

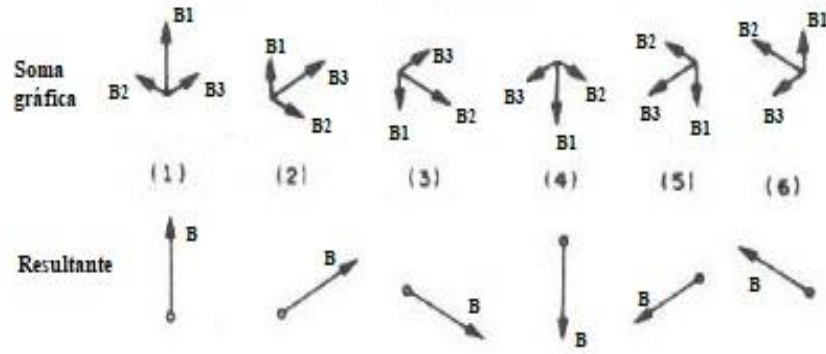


Figura 30 Campo girante em 6 instantes distintos <sup>28</sup>

Os enrolamentos presentes no estator são alimentados por uma corrente alternada trifásica equilibrada, que por sua vez cria um campo magnético  $\mathbf{B}_s$  girante no entreferro. Este campo girante gira a uma velocidade de sincronismo  $n_s$  (Eq. 11) [38] que depende do número de polos  $P$  (sempre um número par) presentes no estator, estando diretamente relacionado com o tipo de enrolamentos utilizados, e com a frequência elétrica de alimentação do estator  $f_e$ .

$$n_s = \left(\frac{2}{P}\right) f_e \text{ [Hz]} \quad \text{Eq. 11}$$

O campo girante induz uma tensão de frequência de escorregamento  $f_{esc}$  (Eq. 12) no rotor e, conseqüentemente, corrente nos enrolamentos curto-circuitados do mesmo.

$$f_{esc} = s f_e \quad \text{Eq. 12}$$

Sendo  $s$  denominado por escorregamento, conceito este definido como a diferença entre a velocidade de sincronismo  $n_s$  e a velocidade de rotação  $n$  [RPM] do rotor, dado pela Eq. 13 ou por unidade pela Eq. 14.

$$s = n_s - n \quad \text{Eq. 13}$$

<sup>28</sup> Retirado de <https://www.ebah.com.br/content/ABAAAAGIoAD/treinamento-weg-modulo-1?part=5> (última consulta a 30 de setembro de 2018)



$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad \text{Eq. 14}$$

Este valor pode ser influenciado pela carga do motor ou pela presença de algum defeito no mesmo [7]. Como tal, deve ser verificado experimentalmente, sob prejuízo do seu valor real não corresponder ao valor teórico.

As correntes induzidas no rotor, por sua vez, criam um campo magnético  $\mathbf{B}_r$  (campo magnético do rotor) que tende a compensar a variação do fluxo do campo  $\mathbf{B}_s$  (campo magnético do estator), como dita a lei de *Lenz*. A interação entre os campos  $\mathbf{B}_r$  e  $\mathbf{B}_s$  criam um binário  $T$ , dado pela Eq. 15 onde  $k$  é uma constante, que faz girar o rotor na mesma direção que o campo magnético  $\mathbf{B}_s$  [38].

$$T = k(\mathbf{B}_r \times \mathbf{B}_s) \text{ [N.m]} \quad \text{Eq. 15}$$

O rotor opera a uma velocidade estável  $n$  próxima da velocidade de sincronismo  $n_s$ , nunca chegando a atingi-la. Se assim não fosse, os condutores presentes no rotor seriam estacionários face ao campo  $\mathbf{B}_s$ , não sendo induzida corrente nos mesmos, logo não se produzindo torque.

Com o rotor a girar na mesma direção que  $\mathbf{B}_s$ , a frequência das correntes no rotor produz um campo que gira à velocidade de  $sn_s$  em relação ao rotor. Sobreposta a esta rotação está a rotação  $n$  do rotor, concluindo-se que, em relação ao estator, a velocidade de  $\mathbf{B}_r$  é

$$sn_s + n = sn_s + n_s(1 - s) = n_s \text{ [rpm]} \quad \text{Eq. 16}$$

Ou seja, o campo  $\mathbf{B}_r$  gira à mesma velocidade do campo  $\mathbf{B}_s$ , à velocidade de sincronismo  $n_s$ . Uma vez que estes campos rodam sincronizadamente, eles acabam por ser estacionários relativamente um ao outro, produzindo então um binário  $T$  constante, mantendo a rotação do rotor. Notar que, apesar dos campos  $\mathbf{B}_r$  e  $\mathbf{B}_s$  girarem à velocidade de sincronismo  $n_s$  o rotor gira a uma velocidade  $n$  ligeiramente inferior.

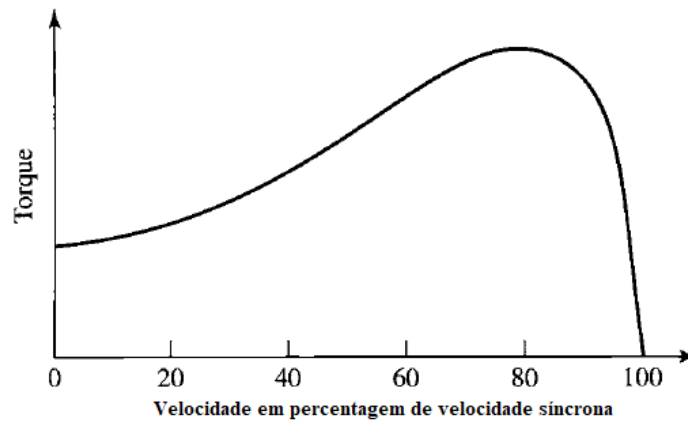
Associado ao funcionamento do motor é possível ainda identificar frequências denominadas de frequência de passagens das cavas (Eq. 17) [39] e frequência de passagem dos polos (Eq. 18) [29], originadas pelos fenômenos eletromagnéticos presentes nas cavas do estator e junto aos polos.

$$f_{pc} = f_r N_c \quad \text{Eq. 17}$$

$$f_{pp} = s N_p \quad \text{Eq. 18}$$

Sendo  $f_r$  a frequência de rotação do rotor,  $s$  o escorregamento  $N_c$  o número de cavas do estator e  $N_p$  o número de polos do motor.

A Figura 31 representa uma curva típica de torque-velocidade para uma tensão e frequência constante de operação para um motor elétrico de indução.



**Figura 31** Curva típica torque-velocidade de um motor de indução<sup>29</sup>

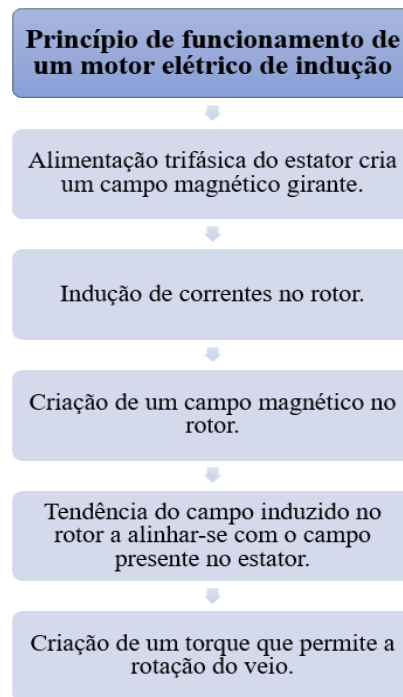
A análise da Figura 31 mostra que, no instante inicial, o rotor está parado, ou seja, no instante inicial do arranque do motor o rotor tem uma velocidade  $n=0$  e escorregamento máximo,  $s=1$ . Nos instantes imediatamente a seguir as correntes induzidas no rotor geram o campo  $\mathbf{B}_r$  que, devido a interação com o campo  $\mathbf{B}_s$ , origina um binário que, caso seja suficiente para vencer a inércia do rotor, tende a iniciar a rotação do mesmo até estabilizar na sua velocidade de operação. Neste momento o motor opera com um determinado valor de escorregamento. Caso o escorregamento diminua tendendo

---

<sup>29</sup> Retirado de [44]

para zero, verifica-se uma queda significativa no torque e, consequentemente, na rotação do rotor. Isto deve-se ao facto de deixar de haver indução de corrente nos condutores do rotor a partir do momento que estes se tornam estacionários face ao campo  $B_s$ .

Simplificando, o motor elétrico de indução funciona de acordo com a sequência presente na Figura 32.



**Figura 32 Princípio de funcionamento de um motor elétrico de indução**

O motor elétrico de indução toma esta designação pelo facto de o estator induzir corrente e, consequentemente, um campo magnético no rotor. Podendo também ser chamado de motor assíncrono uma vez que a velocidade de rotação do rotor não está sincronizada com a velocidade de rotação do campo girante, em oposição ao motor síncrono – não estudado na presente dissertação.

### **4.3. Importância no meio naval**

São vários os sistemas a bordo de um navio e no meio naval que dependem do correto funcionamento de um motor elétrico para operar.

Na Marinha Portuguesa verifica-se a aplicação de motores elétricos de indução nos mais variados sistemas a bordo, como é o caso do acionamento de compressores em instalações de frio, do acionamento das mais diversas bombas, motores propulsores, guinchos elétricos, gruas, entre outros, como se comprova na Figura 33 à Figura 37.



**Figura 33 Motores elétricos trifásicos propulsores com rotor em gaiola de esquilo - Classe Viana do Castelo**



**Figura 34 Bomba do leme - Classe Tejo**



**Figura 35 Bomba de vácuo do circuito de sanitários - Classe Tejo**



**Figura 36 Compressor de ar de arranque de motores principais Classe Tejo**



**Figura 37 Bomba do circuito de água glicolada do sistema de ar condicionado Classe Tejo**

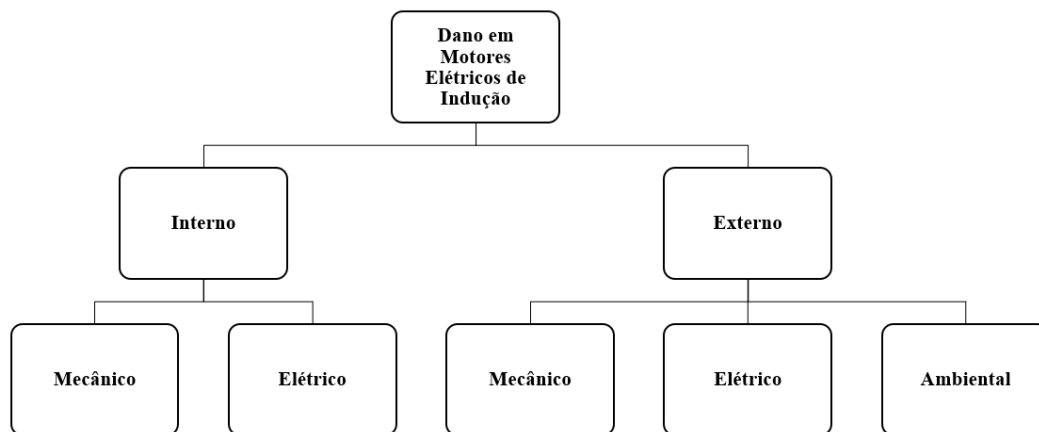
Apesar de ser muito pouco tida em conta, a inoperacionalidade de um motor elétrico pode comprometer o funcionamento de sistemas, como o ar condicionado e sanitários essenciais ao bem-estar da guarnição, e sistemas de propulsão (elétrica) e governo de um navio, colocando em risco o material e o pessoal comprometendo o sucesso das unidades navais nos mais variados empenhamentos operacionais. Também em portos e docas se verifica a utilização do motor elétrico, como é o caso de empilhadores e gruas aplicados no transporte de material.

Assim se conclui que a importância do motor elétrico no meio naval advém da sua enorme aplicabilidade nos mais variados sistemas e que, mesmo quando não é um componente vital destas instalações, tem a capacidade de inviabilizar a sua utilização caso esteja danificado.

#### 4.4. Danos típicos

Apesar da robustez e da fiabilidade dos motores elétricos de indução, estes também se danificam, como qualquer outra máquina. Conhecer previamente os danos tipo existentes nesta máquina é conveniente, na medida em que possibilita a adoção de adequadas técnicas de manutenção e leva o operador a procurar, de uma forma direta, anomalias que podem, no extremo, levar à falha catastrófica.

Os tipos de danos presentes em motores elétricos de indução são classificados de acordo com o apresentado na Figura 38.



**Figura 38 Classificação do tipo de dano com base na bibliografia existente**

Neste trabalho despreza-se se os danos são de origem interna ou externa, sendo mais oportuno conhecer o modo com que cada dano se relaciona com a integridade física do motor ou com o seu campo eletromagnético, ou seja, se estes são de origem mecânica ou de origem elétrica.

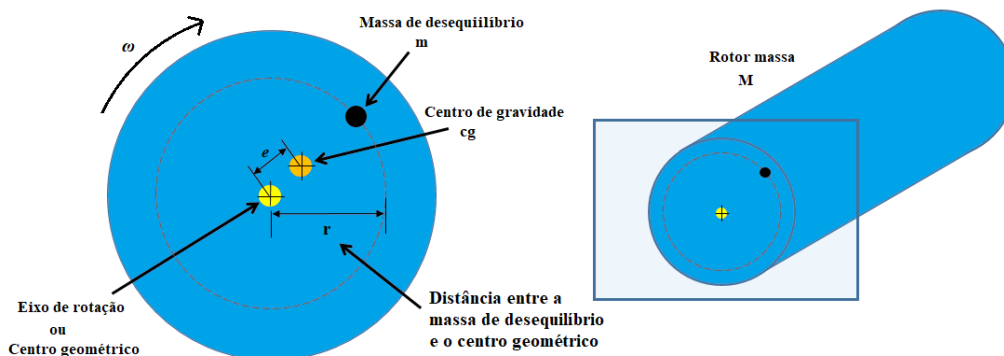
##### 4.4.1. Desequilíbrio

É um dos problemas mais comuns em máquinas rotativas e resulta da existência de uma força centrífuga proveniente de uma distribuição assimétrica de massas, que faz com que o centro de gravidade do rotor não coincida com o eixo de rotação e este com o eixo principal de inércia.

O desequilíbrio torna-se mais notável quanto mais rotativo for o motor. Isto deve-se ao facto de a força centrífuga aumentar com o quadrado da rotação do rotor (Eq. 19).

$$F_c = Me\omega^2 \quad \text{Eq. 19}$$

( $M$  é a massa do rotor,  $e$  a excentricidade, ou seja, a distância entre o centro de gravidade e o centro geométrico do rotor e  $\omega$  a rotação do rotor)



**Figura 39 Representação gráfica do desequilíbrio<sup>30</sup>**

O desequilíbrio pode ser classificado como estático ou dinâmico.

O desequilíbrio estático, na prática, ocorre quando o diâmetro  $d$  do rotor é muito maior do que o comprimento  $l$  do mesmo ( $\frac{d}{l} \geq \frac{10}{1}$ ) ou quando um único disco é colocado ao num veio longo. Se estas condições não se verificarem, o desequilíbrio é classificado como dinâmico [22], tipo de desequilíbrio mais comum de ser encontrado.

Independentemente do tipo de desequilíbrio, este pode manifestar-se em um veio apoiado, em um rotor suspenso e na ventoinha do motor, manifestando-se assim de formas ligeiramente diferentes.

O desequilíbrio ocorre devido a defeitos de fabrico, agregação ou desagregação de material, corrosão, erosão, desgaste, fratura, desaperto mecânico, tensões térmicas e acumulação de sujidade. A sua presença pode levar a problemas nos rolamentos, estruturas de suporte ou no entreferro e pode intensificar-se devido a problemas, como o empeno do veio ou desalinhamento [28].

O desequilíbrio pode ser corrigido através da aplicação de diversas técnicas de equilibragem existentes, que variam conforme o tipo de desequilíbrio presente e

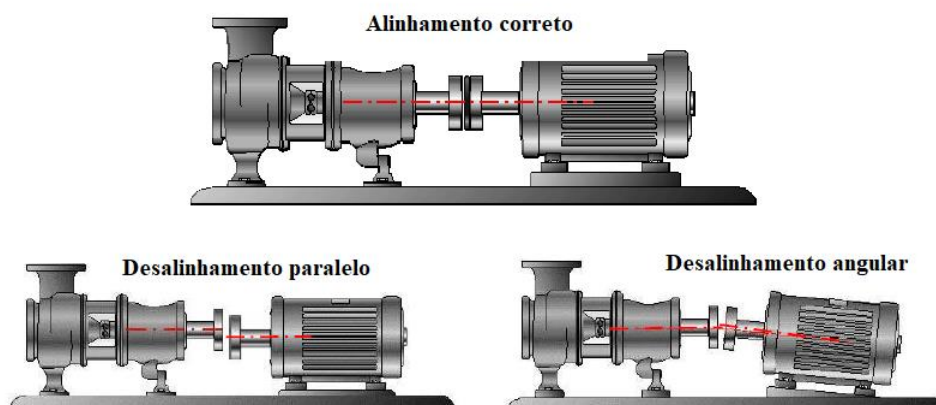
<sup>30</sup> Retirado de <https://community.plm.automation.siemens.com/t5/Testing-Knowledge-Base/Balancing-Static-Coupled-and-Dynamic/ta-p/385267> (última consulta a 26 de dezembro de 2018)

instrumentação disponível, que por sua vez são fornecidas como serviço por diversas empresas<sup>31</sup>.

#### 4.4.2. Desalinhamento

Uma situação de desalinhamento ocorre quando o rotor não possui o seu eixo concêntrico com o eixo da chumaceira, com o eixo da máquina mandante ou com o eixo do rotor que este acopla. Podem ser causas da sua existência a deficiente montagem de acoplamentos, chumaceiras desalinhadas, rolamentos inclinados, pernos ou estruturas de suporte aliviados, apoios que cederam e tensões térmicas não previstas.

O desalinhamento pode ser essencialmente de dois tipos, paralelo ou angular (Figura 40).



**Figura 40 Alinhamento correto, Desalinhamento paralelo, Desalinhamento angular** <sup>32</sup>

O desalinhamento diz-se angular quando há diferentes ângulos do plano horizontal entre dois eixos paralelos, provocando um momento fletor no veio, e diz-se paralelo quando as linhas de dois eixos paralelos não estão na mesma linha, provocando uma tensão de corte e um momento fletor nos extremos do veio. O desalinhamento pode ainda existir como a combinação destes dois [8].

<sup>31</sup> A Specman (<http://www.specman.pt/index.html> - última consulta a 26 de dezembro de 2018) é exemplo de uma empresa, a operar em Portugal, que tem como um dos seus serviços a equilibragem no local, tendo já efetuada diversas equilibragens a bordo de navios da marinha mercante que atracam no porto de Lisboa.

<sup>32</sup> Retirado de [22]



Excluindo as alterações térmicas existentes no material, caso os veios fossem colineares, um acoplamento rígido seria o suficiente para unir a extremidade de dois veios, não sendo induzida qualquer tipo de flexão nos mesmos. Contudo, é muito difícil atingir-se esta situação ideal. Uma solução para a minimização deste problema é a utilização de acoplamentos flexíveis (Figura 41), desenhados para permitir a existência de movimento axial e radial.



**Figura 41 Exemplo de um acoplamento flexível**

Mas a utilização de acoplamentos flexíveis, por si só, não elimina o desalinhamento, sendo necessário o correto alinhamento dos veios através da utilização do relógio comparador ou sistemas de alinhamento a *Laser*, facultados por diversas empresas<sup>33</sup>.

Além da flexão do veio e eventual quebra do mesmo, o desalinhamento tem como consequência a diminuição do desempenho do motor, alteração nas folgas existentes, desgaste dos rolamentos, juntas e acoplamentos, aumento do consumo de energia, ruído, vibração e desequilíbrio do sinal de corrente do estator.

A substituição ou reparação de componentes como rolamentos, juntas e acoplamentos com uma frequência inferior a 5 anos poderá ser indicador da existência de desalinhamento.

#### **4.4.3. Empeno**

Um rotor diz-se empenado quando o seu eixo geométrico não é definido por uma linha reta. Esta situação pode ocorrer devido a vários fatores como excesso de carga,

---

<sup>33</sup> Consultar <http://www.fixturlaser.com/> (última consulta a 24 de dezembro de 2018) para mais informação relativa a sistemas de alinhamento a Laser.

alterações térmicas, desgaste ou flexão gravítica (períodos de inatividade superiores a 6 meses), e pode originar situações de fricção do rotor, excentricidade e falha nos rolamentos.

#### **4.4.4. Folgas e Desaperto**

Folgas e desaperto são problemas bastante comuns em máquinas. Tanto folgas como desaperto podem existir devido ao desgaste da rosca de parafusos e porcas, contacto imperfeito entre componentes, montagens incorretas e aplicação deficiente de juntas. O desaperto pode também desenvolver-se devido à existência de grandes forças centrífugas em máquinas rotativas que operem a velocidades elevadas. O movimento do rotor pode fazer com que as peças de soltem, quando não projetadas corretamente ou alteradas durante ações de manutenção [32]. O seu perigo está essencialmente na possibilidade dos seus choques excitarem ressonâncias.

O desaperto de apoios é um caso específico de desaperto. “Pata coxa” é o nome dado quando um dos apoios do motor não está apoiado de igual forma que os restantes [40]. Apoios apertados desigualmente alteram os padrões de funcionamento do motor podendo levar ao aparecimento de outros danos.

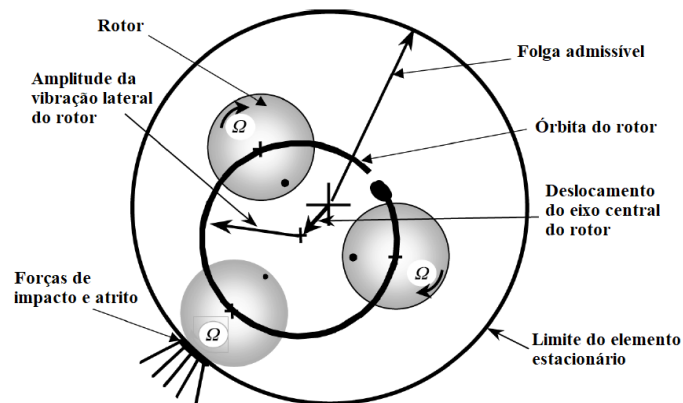
O problema de desaperto é possível resolver recorrendo-se à verificação periódica do estado das roscas e parafusos e devida substituição se necessário, bem como as folgas podem ser corrigidas pela utilização de calços calibrados (Figura 42).



**Figura 42 Correção de folga em uma das patas de um motor pela utilização de um calço calibrado** <sup>34</sup>

#### 4.4.5. Fricção do rotor no estator

A fricção do rotor no estator traduz-se num ligeiro encosto momentâneo entre ambos quando o motor está em operação. Este acontecimento causa a alteração do equilíbrio de forças do sistema resultando numa modificação do movimento do motor.

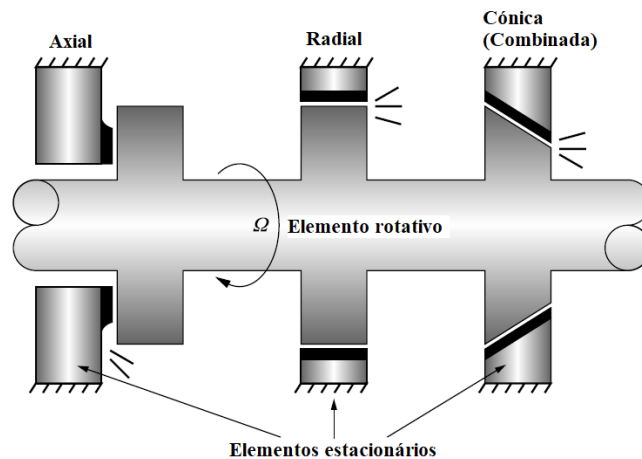


**Figura 43 Fricção radial do rotor em um elemento estacionário** <sup>35</sup>

A fricção do rotor pode ser radial, axial ou cónica (combinada), conforme o eixo em que ocorra (Figura 44). A fricção radial ocorre quando a vibração lateral do rotor e o seu deslocamento da linha central excede a folga disponível, semelhante à fricção axial que ocorre devido aos deslocamentos axiais. A fricção acaba cónica por ser a combinação de ambas.

<sup>34</sup> Os calços calibrados são também utilizados para corrigir casos de desalinhamento vertical.

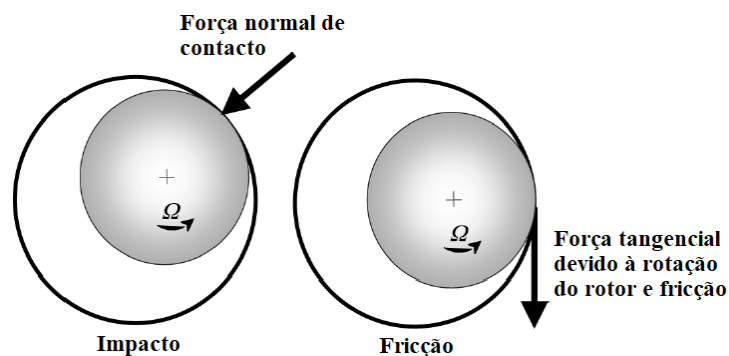
<sup>35</sup> Retirado de [42]



**Figura 44 Possíveis locais de fricção do rotor** <sup>36</sup>

O contacto físico entre o rotor e o elemento estacionário envolve fenómenos como o atrito, o impacto e a alteração da rigidez do sistema, aumentando-a devido ao acoplamento físico, advindo modificações imprevisíveis nas frequências naturais do rotor. Estes fenómenos poderão ser afetados pelo efeito térmico.

A fricção na superfície de contacto gera uma força tangencial na direção oposta à velocidade de rotação do rotor, retardando o seu movimento e provocando a dissipação de energia, o que diminui a eficiência do motor. É gerada também uma força normal resultante do impacto direto do rotor na superfície (Figura 45).



**Figura 45 Forças geradas pela fricção do rotor** <sup>37</sup>

Este dano é consequência da existência de outros danos como desequilíbrio, desalinhamento, ressonância, empeno ou excentricidade, e geralmente origina o desgaste da zona de contacto e do rotor. Eventualmente, poderá desaparecer naturalmente, uma vez que o desgaste abre a folga quebrando o contacto entre o rotor e o elemento

<sup>36</sup> Retirado de [42]

<sup>37</sup> Retirado de [42]

estacionário. Contudo isto não significa que o motor passe a operar nas condições devidas e não invalida a existência de outros danos causados por este.

#### 4.4.6. Falha nos rolamentos

Um rolamento (Figura 46) tem como função básica a transferência de forças rotativas e redução do atrito no sistema. São fabricados com tolerâncias muito reduzidas devido ao facto de serem componentes muito precisos de uma máquina.

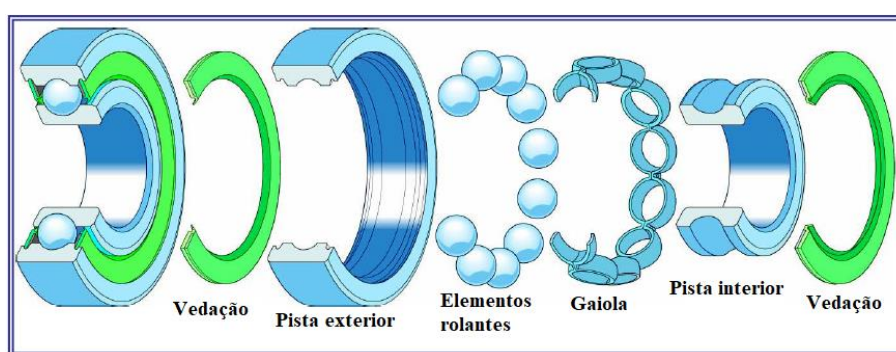


Figura 46 Constituição de um rolamento <sup>38</sup>

O controlo de condição de rolamentos e a determinação de quando é que estes devem ser substituídos é um fator de grande importância na operação de qualquer máquina. Os rolamentos danificam-se acabando por transmitir vibração aos componentes estáticos do motor. Falhas locais produzem uma série de impactos que podem excitar frequências de ressonância na estrutura do rolamento, na chumaceira e no motor [31].

Os rolamentos seguem um percurso bem previsível desde o aparecimento inicial de pequenas fendas até à sua falha catastrófica. Começam por aparecer pequenas fendas nas pistas e nos elementos rolantes que se desenvolvem gradualmente devido à corrosão e à perda de material pelo impacto repetitivo de componentes em movimento [30], culminando no colapso do rolamento.

Aquando o aparecimento inicial de dano, este só pode ser detetado através da deteção de frequências de vibração elevadíssimas (250 a 350 kHz) e de baixa amplitude [29]. Quando este evolui, começa a excitar as frequências naturais do rolamento, podendo

---

<sup>38</sup> Retirado de [22]

iniciar pequenos períodos de ressonância. O evoluir do dano intensifica o desgaste do rolamento, potenciando o aparecimento de componentes múltiplas da frequência de rotação e de baixas frequências. Com o tempo o problema agrava, levando ao aparecimento de altas frequências de banda aleatória, terminado o rolamento por colapsar [22].

Falhas nos rolamentos são causadas devido à fadiga do material, defeitos de fabrico, corrosão, lubrificação imprópria, contaminação, longos períodos de inatividade, vibração excessiva transmitida ao motor, instalação incorreta e uso inadequado de um rolamento para um propósito específico ou devido à existência de outros danos no motor, como empeno ou desalinhamento do veio, que originam fendas nas pistas interior e/ou exterior ou perda de elementos rolantes. Também as falhas nos rolamentos podem despoletar outros danos no motor como é o caso da excentricidade [12].

O aparecimento de danos em rolamentos pode ser evitado garantindo-se a utilização de rolamentos de qualidade, montando-os corretamente e garantindo uma boa lubrificação e vedação.

#### 4.4.7. Ressonância

Ressonância é o fenómeno que ocorre quando o motor é excitado à sua frequência de ressonância, fazendo com que as suas amplitudes de vibração aumentem até um máximo, originando tensões insuportáveis que levam ao colapso do sistema [18]. Um motor pode ter várias frequências de ressonância (Eq. 21) que se regem pelas frequências naturais do sistema (Eq. 20) e que, apesar de diferentes, estão muito próximas umas das outras.

$$f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Eq. 20}$$

$$f_{ress} = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad \text{Eq. 21}$$

( $k$  é a rigidez,  $m$  a massa e  $\zeta$  o fator de amortecimento que varia entre 0 e 1)

Por este motivo e num sentido prático, procura-se evitar a ressonância, evitando a excitação à frequência natural do sistema.

De um modo simplista, conhecendo-se as frequências naturais do sistema, é possível evitar a ressonância fazendo com que o mesmo não seja excitado por valores de frequência iguais a estes. O teste do impacto<sup>39</sup> e os testes de *run-up* e *coast-down* são formas práticas de descobrir as frequências naturais de um sistema.

Fenómenos de ressonância são propícios de acontecer quando o rotor gira a uma velocidade próxima de uma das frequências naturais do motor, sendo estas velocidades chamadas de velocidades críticas. Outras causas para a ressonância são o desaperto, excitação por choques e excitação devido ao funcionamento de outros aparelhos nas imediações do motor.

A ressonância pode ser dividida em estrutural, caso o componente que esteja em ressonância seja fixo, ou de velocidade crítica, caso seja o veio.

Este problema assume especial importância devido aos danos que pode originar, incluindo a destruição física do motor, e pode ser evitado reduzindo-se a amplitude da excitação, alterando-se a frequência de excitação, a rigidez, a massa do sistema ou introduzindo amortecimento, por exemplo pela aplicação de absorsores ou isoladores de vibração [29].

#### **4.4.8. Chumaceiras de casquilho**

Grande parte dos sistemas acionados por meio de um motor elétrico podem apresentar problemas que não estão diretamente relacionados com o estado de conservação do motor, mas sim com os seus periféricos como é o caso das chumaceiras. Problemas nas chumaceiras, como vibração excessiva, acabam por afetar o motor elétrico levando ao aparecimento ou desenvolvimento de diversos danos.

---

<sup>39</sup> O presente vídeo disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=oTJ7TU7cWo> (última consulta em 27 de dezembro de 2018) apresenta uma explicação sobre o teste do impacto e como é que este pode ser utilizado para descobrir as frequências naturais de um sistema.



**Figura 47 Chumaceira de casquilho**

As chumaceiras apresentam comumente problemas, como aquecimento e desgaste, que levam ao aparecimento de folga excessiva [22] e que se devem essencialmente à deficiente instalação das mesmas, má lubrificação, defeitos na vedação e ao desalinhamento de veios e chumaceiras.

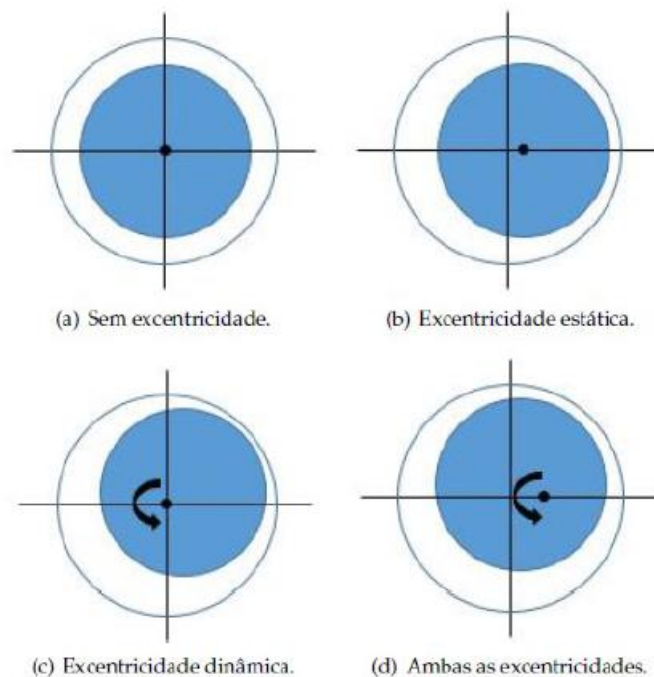
São exemplos de ações de manutenção a verificação da conservação do sistema de arrefecimento e do óleo lubrificante, e devem ser levadas a cabo quando se verifica uma diminuição da eficiência, por exemplo através do aumento de temperatura, ou em situações de desgaste, evidenciadas pelo aparecimento de partículas sólidas no óleo.

#### **4.4.9. Excentricidade do rotor**

A excentricidade do rotor traduz-se na desigualdade de espaçamento no entreferro e é notável pelo descentramento do rotor face ao estator.

Existem dois tipos de excentricidade, a estática e a dinâmica [4]. A excentricidade estática acontece quando a posição do mínimo espaçamento no entreferro é fixa, podendo isto acontecer devido a ovalização do rotor ou ao incorreto posicionamento do mesmo. A excentricidade dinâmica acontece quando o centro do rotor não está no centro de rotação e a posição do mínimo espaçamento no entreferro gira com o rotor.





**Figura 48 Tipos de excentricidade no rotor <sup>40</sup>**

A excentricidade acontece devido a fatores como o empeno, rolamentos danificados, desalinhamento, fenômenos de ressonância ou desequilíbrio de forças que levam a uma variação do espaço no entreferro. A variação do espaçamento faz com que ocorram variações nas indutâncias que conduzem à variação da densidade de fluxo no entreferro, provocando a variação da corrente no motor [12].

Quando a excentricidade é elevada, por ação das forças radiais desequilibradas, pode acontecer que o rotor toque no estator originando danos maiores.

#### **4.4.10. Problemas nas correias**

Muitos dos sistemas aplicados na indústria transmitem potência através de correias. O seu estado de conservação é um fator importante para o bom funcionamento destes sistemas. As correias, normalmente, podem apresentar problemas de desgaste, desaperto, desalinhamento e defeitos de fabrico. Podem danificar a instalação quando são desadequadas ou quando as polias são excêntricas e originar fenômenos de ressonância quando uma das suas frequências naturais coincide com a frequência do acionador ou do

---

<sup>40</sup> Retirado de [34]

acionado. A frequência natural da correia pode ser alterada alterando-se o seu estado de tensão.

#### **4.4.11. Barras partidas**

Este dano está presente em motores com rotor em gaiola de esquilo. Quando uma barra se parte deixa de haver a possibilidade da corrente circular através dela, resultando isto em um fluxo de corrente anormal. A variação deste fluxo irá causar variações nos fluxos magnéticos existentes no motor e por si causar uma perturbação no normal funcionamento do mesmo. Motores com barras partidas apresentam maiores valores de temperatura em zonas específicas, maiores valores de vibração e, conseqüentemente, uma perda de rendimento. O número de barras partidas e a carga do motor determinam se este deixa de funcionar ou não.

As barras normalmente partem junto aos anéis condutores [8]. Isto acontece devido a defeitos de fabrico, arranques e variações de carga constante, sobrecarga térmica ou magnética, corrosão devido à humidade ou abrasão, tensão mecânica devido a laminas soltas ou falha nos rolamentos.

#### **4.4.12. Omissão de fase**

A omissão de uma fase é o dano associado a perda de uma das três fases do motor, geralmente ocasionada por falha em algum fusível, falha de fase na linha de alimentação, conexões danificadas ou inadequadas ou por algum mau contacto existente.

Caso a perda de fase ocorra durante o funcionamento do motor este continuará em funcionamento devido ao torque produzido pelas restantes fases. As fases ativas elevam a corrente na tentativa de compensar a fase omissa aumentando a temperatura podendo danificar o isolamento, originar um curto-circuito ou gerar danos maiores para o motor [28]. Caso a fase falte no arranque o motor poderá não arrancar e originará um aumento de ruído, mas caso arranque, apresentará dificuldades em atingir a velocidade nominal.

Uma forma de proteger o motor deste dano é utilizar um *single phase preventer*, dispositivo que desliga a alimentação do motor assim que ocorra a perda de uma fase evitando que danos maiores sejam gerados.

#### **4.4.13. Curto-circuito**

Um curto-circuito é o transporte de corrente através de um caminho impróprio que apresenta menor valor de impedância do que o caminho devido. Num motor elétrico o curto-circuito pode acontecer entre enrolamentos da mesma fase, no próprio enrolamento, entre fases e fase com ligação a terra [8]. É tipicamente causado devido à contaminação do enrolamento, abrasão, vibração excessiva, picos de tensão, deficiente isolamento entre fases ou utilização de materiais inadequados e incompatíveis com a classe térmica e de tensão do motor.

O curto-circuito numa fase incipiente não afetará o normal funcionamento do motor, mas irá diminuir a sua eficiência progressivamente até se tornar severo e danificá-lo [8] ao ponto causar o desequilíbrio de fases, devido à assimetria na impedância que se cria com o contacto dos condutores, à omissão de fases e à total destruição do isolamento, aumentando a probabilidade de queima do motor.

#### **4.4.14. Falha no isolamento**

A falha no isolamento do motor, na maioria dos casos, é consequência da presença de outros danos. Acredita-se que esta falha começa como uma falha não detetada que cresce e culmina em falhas maiores [4]. É exemplo a existência de um curto-circuito que danifica o isolamento levando ao aumento da temperatura do motor, criando um maior deterioramento do isolamento e, conseqüentemente, a amplificação do curto-circuito [12].

A falha de isolamento no núcleo e nos enrolamentos do estator ou rotor pode também ocorrer devido ao emprego de materiais isolantes inadequados, bobinagem incorreta, temperatura elevada do núcleo ou enrolamentos, refrigeração deficiente, grandes descargas elétricas, laminação incorreta do núcleo e contaminação por óleo,

humidade ou sujidade. No entanto, o sobreaquecimento do motor provocado pela existência de alguma anomalia é a raiz principal deste problema [12].

#### **4.4.15. Falha nas escovas**

Este problema está presente em motores de rotor bobinado e implica o corte na transmissão de corrente entre o rotor e o exterior. Falhas nas escovas podem ocorrer devido ao desalinhamento das escovas ou braços dos porta-escovas, folgas erradas entre escovas e porta-escovas, pressão errada nas escovas devido a problemas na mola, má qualidade das escovas, escovas bloqueadas pela entrada de partículas sólidas no porta-escovas e acumulação de sujidade que pode levar ao aparecimento de faíscas ou à queima das escovas. A transmissão de corrente pode falhar simplesmente pelo desgaste das escovas devido à sua utilização, havendo a necessidade de estas serem repostas.

#### **4.4.16. Desequilíbrio de fases**

O desequilíbrio de fases ocorre devido a cargas desequilibradas ligadas à fonte de alimentação do motor, conexões inadequadas ou altas resistências provocadas por mau contacto e traduz-se na condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão, corrente e/ou desfasamento angular entre fases diferente de  $120^\circ$  [41]. Este dano pode levar à destruição do isolamento e, conseqüentemente, ao curto-circuito devido a um possível aumento de temperatura.

#### **4.4.17. Sobrecarga**

O motor está perante uma situação de sobrecarga quando lhe é aplicada uma carga superior à sua capacidade nominal sendo o seu principal sintoma o aumento da temperatura do motor, podendo resultar na deterioração térmica dos enrolamentos e do seu isolamento. A subtensão e a sobretensão provocam efeitos semelhantes.

Uma forma de proteger o motor deste dano é utilizar um relé de sobrecarga<sup>41</sup>, dispositivo que desliga o motor assim que este entre numa situação de sobrecarga.

#### **4.4.18. Fatores ambientais**

Fatores ambientais podem também ser responsáveis pela existência de algum tipo de dano. É o caso das alterações de temperatura, que elevam a probabilidade de ocorrência de tensões mecânicas, a humidade, que poderá levar à deficiente transmissão de corrente elétrica e perda de isolamento, a falta de higiene do meio, como é o caso de pó e sujidade que se acumula na ventoinha de ventilação, vibrações causadas por outras máquinas na periferia, e ainda as reduzidas dimensões do espaço onde se encontra a instalação, que acabam por dificultar a ventilação.

---

<sup>41</sup> O vídeo presente <https://www.youtube.com/watch?v=1ifKzmFW58s> (última consulta a 29 de dezembro de 2018) explica o princípio de funcionamento de um relé de sobrecarga.



## 5. Sintomatologia de danos mais comuns em motores elétricos de indução

Este capítulo apresenta uma coletânea de sintomas de possíveis danos em motores elétricos de indução, discutidos no capítulo 4, associados à medição de vibrações, análise de corrente e análise termográfica.

A tabela resumo do presente capítulo está presente no Apêndice A.

### 5.1. Desequilíbrio

#### 5.1.1. Análise de vibrações

A vibração causada por desequilíbrio é sinusoidal e causa no espectro de frequência o aumento da amplitude de vibração na componente 1xRPM na direção radial, semelhante horizontalmente e verticalmente, e eventual aparecimento de componentes a 2xRPM, 3xRPM ou 4xRPM com amplitudes relativamente pequenas. Não existe motivos para a existência de grandes amplitudes na direção axial, exceto no caso de rotor suspenso, que devido à flexão do veio se faz acompanhar por movimento nesta direção [3], [22], [29].

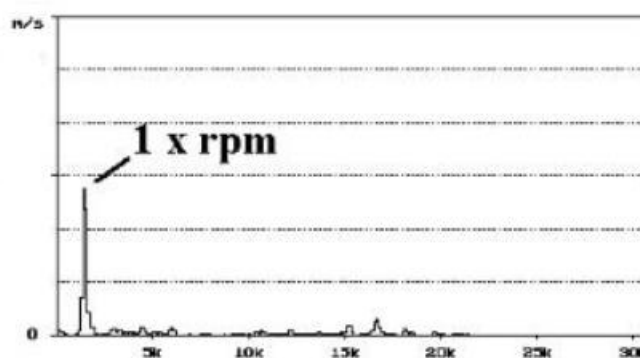
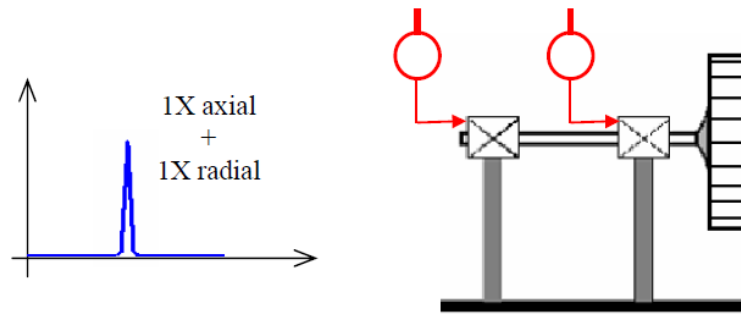


Figura 49 Exemplo de um espectro de frequência de um veio desequilibrado <sup>42</sup>

A amplitude da componente 1xRPM é estável e tem tendência a aumentar com a velocidade de rotação, com a massa de desequilíbrio e com a distância da massa de desequilíbrio ao centro de gravidade [29].

<sup>42</sup> Retirado de <https://www.ebah.com.br/content/ABAAABZvkAI/diagnostico-desequilibrio> (última consulta a 26 de dezembro de 2018)

Uma vez que vários são os danos que se manifestam pelo aumento da amplitude de vibração à componente 1xRPM, é necessário estender à análise a outros indicadores que permitam um diagnóstico mais preciso, como é o caso da relação entre fases em locais precisos do motor (chumaceiras ou suportes de rolamentos). É importante que a diferença de fase entre as medidas horizontal e vertical no plano radial seja de aproximadamente 90°, podendo variar  $\pm 30^\circ$  consoante o desequilíbrio presente. Caso isto não se verifique poder-se-á estar na presença de outro tipo de dano [22]. Contudo, nem sempre a fase é estável, como é o caso de rotor suspenso, que apresenta valores de fase bastante instáveis para a direção radial [29].



**Figura 50** Sintomas de desequilíbrio no caso de rotor suspenso <sup>43</sup>

### 5.1.2. Análise de corrente

A presença de um desequilíbrio no rotor produz excentricidade dinâmica, que resulta numa oscilação do espaço no entreferro. Por sua vez, a variação do espaço no entreferro causa a variação do fluxo magnético presente no mesmo e, consequentemente, a variação da tensão induzida. Esta tensão induzida causa correntes cujas frequências, no estator, são determinadas por [28]

$$f_{unb} = \left[ \frac{k(1-s)}{p} + 1 \right] f_e \quad \text{Eq. 22}$$

Onde  $f_e$  é a frequência de alimentação,  $s$  é o escorregamento dado pela Eq. 14,  $p$  o número de pares de polos e  $k$  é qualquer número inteiro.

---

<sup>43</sup> Retirado de [22]



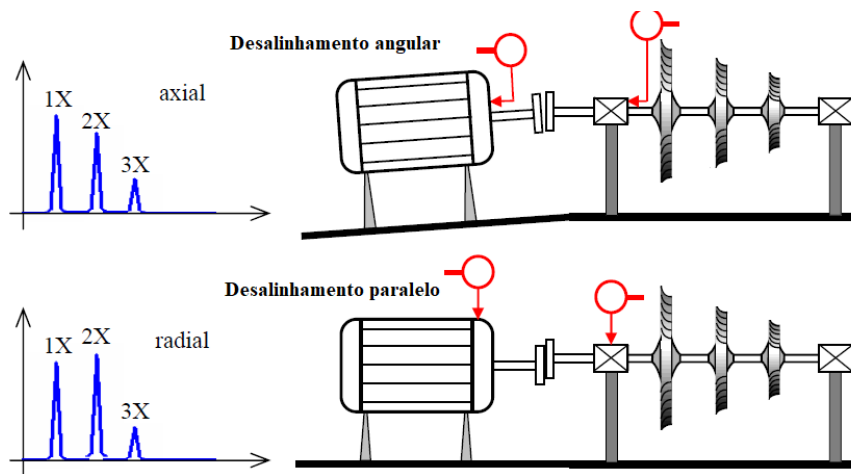
### 5.1.3. Análise termográfica

Não foi encontrada sintomatologia para o presente dano na bibliografia analisada.

## 5.2. Desalinhamento

### 5.2.1. Análise de vibrações

O desalinhamento angular apresenta, no espectro de frequência, grande amplitude de vibração nas componentes 1xRPM e 2xRPM, com uma diferença de fase de aproximadamente de 180°, na direção axial [31], sendo também bastante comum o aparecimento da componente dominante a 3xRPM. Para o desalinhamento paralelo verifica-se praticamente o mesmo na direção radial, com a componente 2xRPM ligeiramente superior às restantes e com uma diferença de fase de aproximadamente de 180°, nas direções axial e radial [3], [22].



**Figura 51 Sintomas de desalinhamento por análise de vibrações <sup>44</sup>**

Quando o desalinhamento, tanto angular como paralelo, é significativo, poderão ser geradas inúmeras harmónicas (4xRPM a 8xRPM) e componentes de amplitude elevada proporcionais ao nível de desalinhamento, existindo a possibilidade de estas variarem conforme a direção de medida [29].

As medições devem ser efetuadas com o motor à temperatura normal de funcionamento, uma vez que o desalinhamento é sensível à variação de temperatura,

<sup>44</sup> Retirado de [22]

podendo a variação dos níveis de vibração, especificamente das harmônicas, durante uma alteração de temperatura, ser um bom indicador de desalinhamento [29]. Contudo, devido a inúmeros fatores externos, não se garante que os sintomas de um motor desalinhado sejam totalmente coincidentes com o apresentado [29].

### **5.2.2. Análise de corrente**

O desalinhamento produz harmônicas laterais em torno da frequência de alimentação dadas por [34]

$$f_{mis} = (f_e \pm k f_r) \quad \text{Eq. 23}$$

Sendo que  $f_e$  é a frequência de alimentação,  $k$  um inteiro positivo e  $f_r$  a frequência de rotação do rotor.

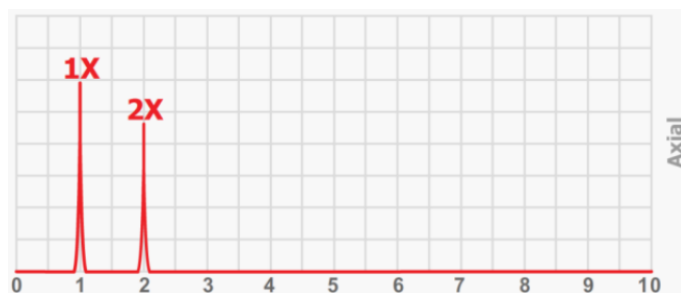
### **5.2.3. Análise termográfica**

Aumento da temperatura nos locais de acoplamento devido às forças presentes e necessidade de fornecer mais energia ao motor para que este opere [22] e aumento da temperatura dos rolamentos e chumaceiras devido ao aumento da fricção [8].

## **5.3. Empeno**

### **5.3.1. Análise de vibrações**

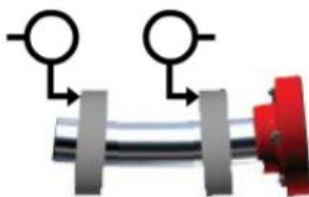
O espectro apresenta, na direção axial, componentes de grande amplitude a 1xRPM e 2xRPM [22] e eventual aparecimento da componente a 3xRPM [29]. Poderão aparecer componentes radiais a 1xRPM e 2xRPM, no entanto a vibração axial é o ponto chave para este diagnóstico.



**Figura 52** Espetro de frequência típico para o empeno <sup>45</sup>

As componentes 1xRPM e 2xRPM serão dominantes consoante a distância do empeno ao centro do veio. A componente 1xRPM será dominante se o empeno estiver junto ao centro e a componente 2xRPM se o empeno estiver junto ao acoplamento [40].

O sinal no tempo não é um bom indicador para este dano, a sua forma de onda é incerta e dependente das componentes dominantes. Quanto a relação de fases em locais precisos do motor (chumaceiras ou suportes de rolamentos) esta deverá ser de 180° na direção axial, e de 0° na direção radial [31].



**Figura 53** Relação de fases na direção axial para o caso de empeno <sup>46</sup>

### 5.3.2. Análise de corrente

Não foi encontrada sintomatologia para o presente dano na bibliografia analisada.

<sup>45</sup> Retirado de <https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=8024&iVibe=1&sTitle=Bent%20shaft> (última consulta a 26 de abril de 2019)

<sup>46</sup> Retirado de <https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=8024&iVibe=1&sTitle=Bent%20shaft> (última consulta a 26 de abril de 2019)

### 5.3.3. Análise termográfica

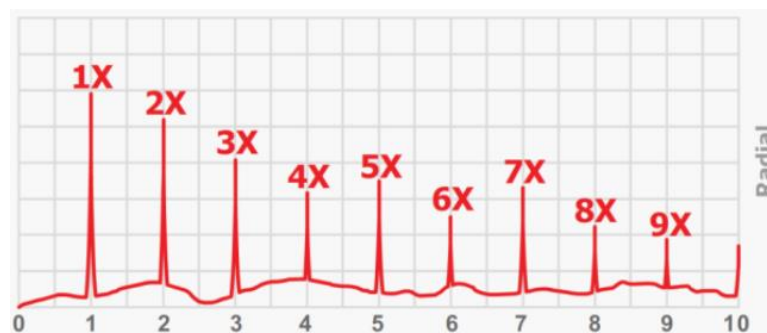
Não foi encontrada sintomatologia para o presente dano na bibliografia analisada.

## 5.4. Desaperto

### 5.4.1. Análise de vibrações

O sinal no tempo tende a ter uma forma de onda cuja amplitude dos picos difere, frequentemente, com a direção [29].

O espectro de frequência apresenta um elevado ruído de chão e componentes de grande amplitude a 1xRPM e 2xRPM na direção radial, com componentes baixas na direção axial. O número de harmônicas aumenta com o desaperto, podendo estar presentes componentes de 1xRPM a 10xRPM e componentes subarmônicas ( $1/2xRPM$ ,  $1/3xRPM$ ,  $2/3xRPM$ , ...) e interarmônicas ( $1,5xRPM$ ,  $2,5xRPM$ , ...) resultantes da não-linearidade dos impactos causados [31], [29].



**Figura 54** Espectro de frequência típico para desaperto <sup>47</sup>

Esta gera uma relação de fases aleatória entre diferentes localizações, verificando-se, para o caso específico de desaperto dos apoios, um desfasamento de  $90^\circ$  a  $180^\circ$  entre o *fixe* e os apoios na direção vertical.

<sup>47</sup>

Retirado de <https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=10004&iVibe=1&sTitle=Analysis%20Definitions> (última consulta a 12 de junho de 2019)

#### 5.4.2. Análise de corrente

Não foi encontrada sintomatologia para o presente dano na bibliografia analisada. Contudo, visto que o desapareto é um dano puramente mecânicas conjectura-se que não tenha influência nas correntes nem nos campos magnéticos gerados no motor.

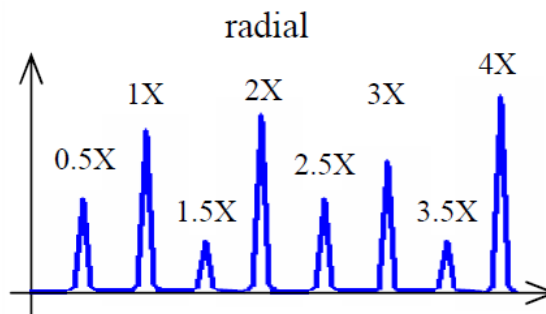
#### 5.4.3. Análise termográfica

Não foi encontrada sintomatologia para o presente dano na bibliografia analisada.

### 5.5. Fricção do rotor no estator

#### 5.5.1. Análise de vibrações

O sinal no tempo assemelha-se a uma sinusoidal, deformando-se no momento em que ocorre o contacto [29]. Quanto ao espectro, existe o aparecimento de uma série de frequências múltiplas da frequência de rotação (harmónicas, subarmónicas e interarmónicas) na direcção radial [22], [29], [42].



**Figura 55 Sintoma de fricção do rotor no estator por análise de vibrações <sup>48</sup>**

A deteção deste dano é complicada na medida em que quase todas as frequências podem ocorrer no espectro, incluindo frequências de ressonância dos vários componentes do motor [22] e os valores de fase não são consistentes.

---

<sup>48</sup> Retirado de [22]

### 5.5.2. Análise de corrente

Não foi encontrada sintomatologia para o presente dano na bibliografia analisada.

### 5.5.3. Análise termográfica

A fricção do rotor no estator causa o aumento da temperatura e consequente expansão térmica do local. A expansão térmica local pode fazer com que o rotor se curve originando uma força adicional de desequilíbrio, originando-o ou intensificando-o. Caso exista a presença de fluidos nas áreas de fricção, o calor gerado pelo atrito pode ser dissipado, tornando o aquecimento e o processo de expansão térmica do rotor relativamente lentos [42].

## 5.6. Falha nos rolamentos

### 5.6.1. Análise de vibrações

Um rolamento pode apresentar problemas no elemento rolante, na pista exterior, na pista interior e/ou na gaiola. Consoante a origem do dano existente assim variam as frequências verificadas no espectro de frequência, sendo estas aproximadas pelos valores da Tabela 1 [4].

**Tabela 1 Frequências de dano em rolamentos**

<b>Frequência de dano na pista exterior</b> $f_{ext} [Hz] = \frac{N_e}{2} f_r [1 - \frac{d_b}{d_p} \cos(\beta)] \text{ Eq. 24}$
<b>Frequência de dano na pista interior</b> $f_{int} [Hz] = \frac{N_e}{2} f_r [1 + \frac{d_b}{d_p} \cos(\beta)] \text{ Eq. 25}$

<p><b>Frequência de dano no elemento rolante</b></p> $f_{rol} [Hz] = \frac{d_p f_r}{2d_b} [1 - (\frac{d_b}{d_p} \cos(\beta))^2] \text{ Eq. 26}$
<p><b>Frequência de dano na gaiola</b></p> $f_{gai} [Hz] = \frac{1}{2} f_r [1 - \frac{d_b}{d_p} \cos(\beta)] \text{ Eq. 27}$
<p><b>NOTA:</b> As expressões apresentadas aplicam-se ao caso em que o anel externo está fixo. Caso o anel externo seja rotativo os sinais são invertidos (exceto para o dano nos elementos rolantes) [22].</p>

Onde  $N_e$  é o número de esferas,  $f_r$  a frequência de rotação em Hz,  $d_b$  o diâmetro das esferas,  $d_p$  o diâmetro do passo da esfera <sup>49</sup> e  $\beta$  o ângulo de contato entre a esfera e a pista, em graus.

Estatisticamente, mostrou-se que as frequências de vibração podem ser aproximadas para a maioria dos rolamentos com 6 a 12 esferas pelos valores da Tabela 2 [29], [6], [40].

**Tabela 2** Frequências de dano em rolamentos obtidas estatisticamente

<p><b>Frequência de dano na pista exterior</b></p> $f_{ext} [Hz] = 0.4 N_e f_r \text{ Eq. 28}$
<p><b>Frequência de dano na pista interior</b></p> $f_{int} [Hz] = 0.6 N_e f_r \text{ Eq. 29}$
<p><b>Frequência de dano no elemento rolante</b></p> $f_{rol} [Hz] = 0.23 N_e f_r \text{ para } N_e < 10 \text{ Eq. 30}$ $f_{rol} [Hz] = 0.18 N_e f_r \text{ para } N_e \geq 10 \text{ Eq. 31}$

<sup>49</sup> Equivalente ao diâmetro da gaiola do rolamento.

<p style="text-align: center;"><b>Frequência de dano na gaiola</b></p> $f_{gai} [Hz] = 0.4f_r \text{ Eq. 32}$
<p><b>NOTA:</b> As expressões apresentadas aplicam-se ao caso em que o anel externo está fixo. Caso o anel externo seja rotativo a expressão para a frequência de dano na gaiola passa a <math>0.6f_r</math> e as expressões de dano para os elementos rolantes invertem para o intervalo de <math>N</math> [40].</p>

A detecção de danos em rolamentos através da análise de vibrações é afetada pela velocidade do motor, particularmente quando os rolamentos apresentam uma condição deteriorada. A vibração apresentada pelo motor pode ser pequena mesmo que o dano presente nos rolamentos seja iminente [4]. Deve-se então efetuar a análise de vibrações para diferentes valores de velocidades do motor e com diferentes intervalos de periodicidade.

O espectro de frequências deve referir-se ao parâmetro velocidade, parâmetro que melhor cobre estas frequências, aconselhando-se a utilização de uma escala logarítmica devido a existência de amplitudes muito pequenas [40]. É usual o aparecimento de bandas laterais centradas na frequência de falha e de ressonância da caixa do rolamento, que vão evoluindo à medida que o dano se agrava [40].

É de ter em atenção que as frequências de dano são calculadas tendo por base a geometria do rolamento. Os elementos rolantes devem rolar e não deslizar. Na prática, as frequências próprias do dano podem não corresponder as frequências especificamente calculadas [29].

### 5.6.2. Análise de corrente

As frequências de vibração anteriormente referidas refletem, no espectro de corrente do estator, uma frequência dada por [4], [3], [33], [6]

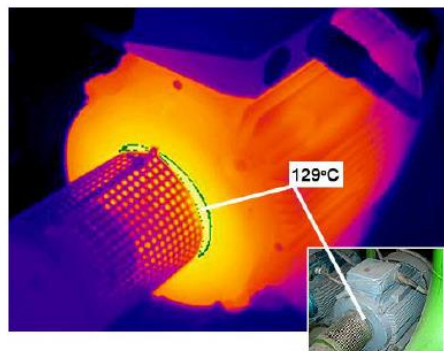
$$f_{der} = |f_e \pm kf| \quad \text{Eq. 33}$$



Onde  $f_e$  é a frequência elétrica de alimentação do estator,  $k$  um inteiro positivo e  $f$  é a frequência característica do dano existente ( $f_{ext}$ ,  $f_{int}$ ,  $f_{rol}$  ou  $f_{gai}$ ).

### 5.6.3. Análise termográfica

Observa-se que qualquer dano presente em rolamentos implica o aumento da fricção entre os seus elementos, o que leva ao aumento da temperatura do próprio rolamento [28], [3].



**Figura 56 Exemplo termográfico de um motor com rolamentos danificados** <sup>50</sup>

A Figura 56, apesar de não apresentar legenda com gradientes de temperatura, mostra que a zona dos rolamentos danificados possui uma temperatura superior à temperatura do restante motor.

## 5.7. Excentricidade do rotor

### 5.7.1. Análise de vibrações

A existência de excentricidade estática origina componentes de frequência com o valor de duas vezes a frequência de alimentação,  $2f_e$  [29]. A excentricidade dinâmica origina bandas laterais de frequência de escorregamento em torno de  $f_r$  e  $2f_e$  [3], [29]. A estes valores acrescentam-se os valores de frequência da Tabela 3 [3], [31].

---

<sup>50</sup> Retirado de [11]

**Tabela 3** Frequências de dano devido à excentricidade

<p style="text-align: center;"><b>Excentricidade estática</b></p> $f_{exes} = \left[ (kN_c) \frac{(1-s)}{p} \pm \nu \right] f_e \text{ Eq. 34}$
<p style="text-align: center;"><b>Excentricidade dinâmica</b></p> $f_{exdi} = \left[ (kN_c \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm \nu \right] f_e \text{ Eq. 35}$

Onde  $k$  é um inteiro positivo,  $N_c$  é o número de cavas do rotor,  $s$  é o escorregamento dado pela Eq. 14,  $p$  é o número de pares de polos,  $\nu$  um número par,  $f_e$  é a frequência de alimentação e  $n_d = 1, 2, 3, \dots$ , para a excentricidade dinâmica.

Se coexistirem os dois tipos de excentricidade podem aparecer componentes de baixa frequência dadas por [4]

$$f_{exbf} = 2f_e \pm f_r \quad \text{Eq. 36}$$

Sendo  $f_r$  a frequência de rotação e  $f_e$  a frequência de alimentação.

### 5.7.2. Análise de corrente

A presença de excentricidade estática ou dinâmica revela, no espectro de corrente do estator, as componentes de frequência dadas por [4], [3], [33]

$$f_{ex} = \left[ (kN_c \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm n \right] f_e \quad \text{Eq. 37}$$

Onde  $n_d$  é a ordem de excentricidade e assume o valor de  $n_d = 0$  quando a excentricidade é estática e  $n_d = 1, 2, 3, \dots$  quando a excentricidade é dinâmica,  $f_e$  é a frequência de alimentação,  $N_c$  é o número de cavas do rotor,  $s$  é o escorregamento dado pela Eq. 14,  $p$  é o número de pares de polos,  $k$  um inteiro positivo e  $n$  um número ímpar.

Se coexistirem os dois tipos de excentricidade junto à frequência de alimentação poderão existir baixas frequências dadas por [4]

$$f_{exbf} = |f_e \pm kf_r| \quad \text{Eq. 38}$$

Com  $k = 1, 2, 3, \dots$  e  $f_r$  a frequência de rotação.

### 5.7.3. Análise termográfica

Não foi encontrada sintomatologia para o presente dano na bibliografia analisada. Contudo, pressupõem-se que devido à excentricidade originar tensão nos suportes do rotor que isto leve ao aumento da temperatura dos rolamentos presentes nos mesmos.

## 5.8. Barras partidas

Os sintomas aqui apresentados aplicam-se a barras partidas e à quebra dos anéis condutores.

### 5.8.1. Análise de vibrações

A vibração surge na direção axial devido à força axial gerada pela interação da corrente entre barras com o fluxo do estator [4].

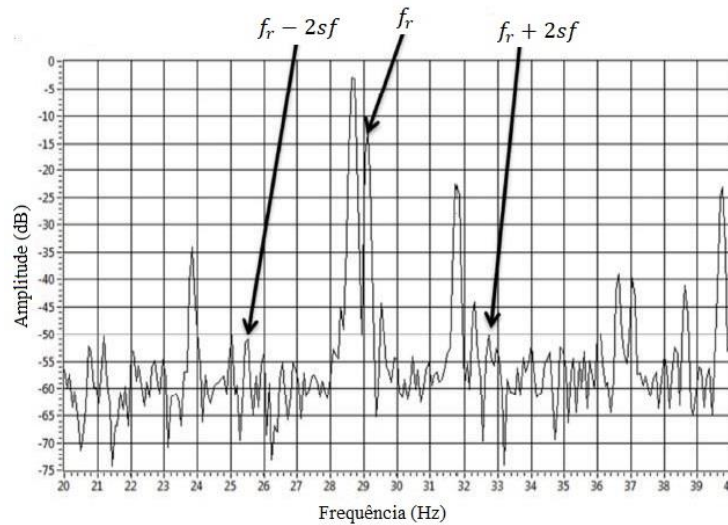
Barras partidas originam componentes de frequência definidas por [7], [3], [9]

$$f_{bp} = f_r \pm 2sf_e \quad \text{Eq. 39}$$

Onde  $f_r$  é a frequência de rotação do motor,  $f_e$  a frequência de alimentação e  $s$  é o escorregamento dado pela Eq. 14.

Para que este dano se manifeste com relativa facilidade, o motor deve possuir uma elevada carga [29]. A sua severidade é dada pela diferença de amplitude entre a frequência de alimentação e a primeira banda lateral, sendo que, quanto menor a diferença, mais

severo é o caso de barras partidas, ou seja, maior o número de barras partidas e maiores as fendas e fissuras existentes [5], [19].



**Figura 57** Exemplo de um espectro de frequência para um motor com duas barras partidas  
51

A estas somam-se uma variedade de frequências secundárias relacionadas à rotação do motor e à sua alimentação [7], como bandas laterais dadas pela frequência de escorregamento e passagem dos polos [29] em torno da componente a 1xRPM e bandas laterais dadas pela frequência de passagem dos polos em torno das componentes a  $f_e$ ,  $5f_e$  e  $7f_e$  [29].

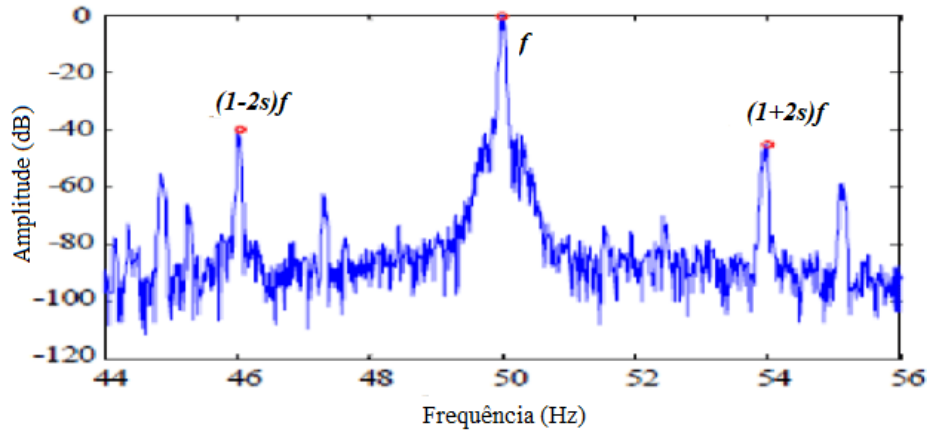
### 5.8.2. Análise de corrente

A detecção de barras partidas através da análise de corrente é, em geral, mais sensível do que em outros métodos, como a análise de vibração [7]. Barras partidas originam uma sequência de bandas laterais  $f_{bp}$  em torno da frequência de alimentação do estator dadas por [4], [28], [33]

$$f_{bp} = (1 \pm 2ks)f_e \quad \text{Eq. 40}$$

<sup>51</sup> Retirado de [https://www.researchgate.net/figure/Vibration-spectrum-for-two-broken-bars\\_fig2\\_319406614](https://www.researchgate.net/figure/Vibration-spectrum-for-two-broken-bars_fig2_319406614) (última consulta a 28 de dezembro de 2018)

Sendo  $s$  o escorregamento dado pela Eq. 14,  $k$  um inteiro positivo e  $f_e$  a frequência de alimentação.



**Figura 58 Exemplo de um espectro de frequência para um motor com um barra partida** <sup>52</sup>

É explicado que a banda lateral inferior se deve especificamente à barra partida existente e que a banda lateral superior se deve à consequente oscilação de velocidade.

Podem também ser observadas outras componentes espectrais dadas por [4]

$$f_{bpbf} = [n(1 - s) \pm s]f_e \quad \text{Eq. 41}$$

Com  $n$  um inteiro ímpar.

Contudo, na prática, tem se verificado que é bastante comum ocorrerem frequências destes valores, mesmo quando os motores são saudáveis [5], dificultando isto o diagnóstico deste dano. Isto pode ser justificado pela resistência irregular das barras devido aos seus processos de fabrico [4].

O diagnóstico baseado na detecção de bandas laterais pode ainda falhar devido à presença de correntes entre barras que reduzem o grau de assimetria do rotor, resultando uma diminuição da amplitude das frequências típicas [9].

<sup>52</sup> Retirado de [https://www.researchgate.net/figure/MCSA-with-FFT-Sidebands-for-One-Broken-Bar-of-The-Induction-Motor\\_fig3\\_283889500](https://www.researchgate.net/figure/MCSA-with-FFT-Sidebands-for-One-Broken-Bar-of-The-Induction-Motor_fig3_283889500) (última consulta a 28 de dezembro de 2018)

### 5.8.3. Análise termográfica

A Figura 59 e Figura 60 mostram o exemplo de um espectro termográfico que compara um motor saudável com um motor com barras e anel condutor partidos, revelando o sobreaquecimento do motor, particularmente nas zonas específicas de quebra, devido ao aumento da corrente [3].

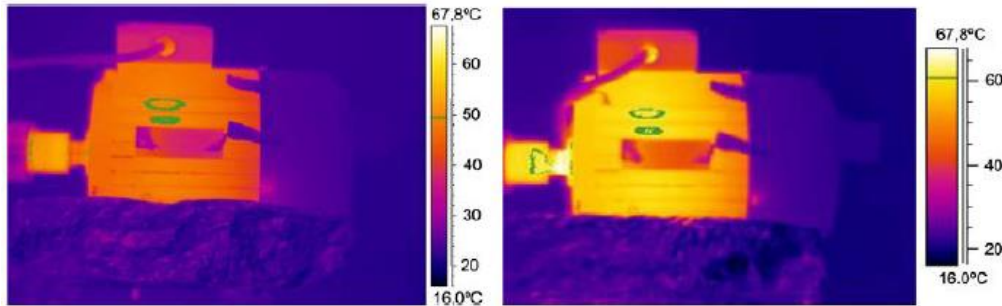


Figura 59 Comparação de um motor saudável (esquerda) com um motor com barras partidas (direita) através da análise termográfica <sup>53</sup>

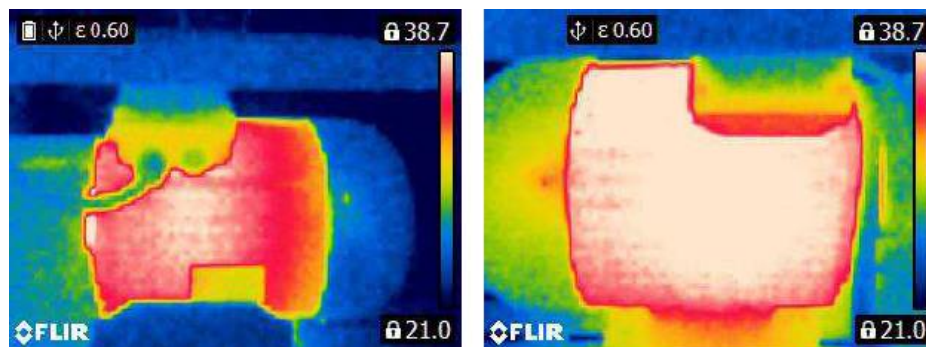


Figura 60 Comparação de um motor saudável (esquerda) com um motor com anel condutor partido (direita) através da análise termográfica <sup>54</sup>

### 5.9. Omissão de fase

Se durante a condição de funcionamento o motor perder uma das fases, este continuará a funcionar devido ao torque produzido pelas restantes fases. Contudo, se a fase estiver omissa no arranque o motor não irá arrancar. Caso o faça será com enorme

<sup>53</sup> Retirado de [11]

<sup>54</sup> Retirado de [14]

esforço e ruído originando um grande nível de vibração e requisição de corrente à rede [28].

#### **5.9.1. Análise de vibrações**

A omissão de umas das fases traduz-se na existência de amplitudes elevadas a 1xRPM, 2xRPM,  $f_e$ ,  $2f_e$  e respectivas subarmónicas [40]. Pode ainda ocorrer o aparecimento de bandas laterais de 1xRPM [29] e de  $\frac{1}{3}f_e$  [43] em torno de  $2f_e$ .

#### **5.9.2. Análise de corrente**

Efetuada-se a medição de corrente nos enrolamentos das três fases, identificar-se-á uma fase em falta, devido a apresentação de erro por parte do sensor ou pela ausência de valores [11]. Também se verificará o aumento em aproximadamente  $\sqrt{3}$  na amplitude das correntes das fases saudáveis, bem como uma diferença de fase de aproximadamente 180° entre estas [28].

#### **5.9.3. Análise termográfica**

Uma vez que as restantes duas fases tentam compensar a fase em falta prevê-se o sobreaquecimento dos enrolamentos não danificados [28].

### **5.10. Curto-Circuito**

#### **5.10.1. Análise de vibrações**

As forças magnéticas existentes no motor farão com que este apresente componentes de vibração com o valor de duas vezes a frequência de alimentação,  $2f_e$ , [8], [29] além da frequência de rotação do motor [11].

### 5.10.2. Análise de corrente

O espectro de corrente, na presença de curto-circuito nos enrolamentos, apresenta componentes dadas por [34], [8], [33]

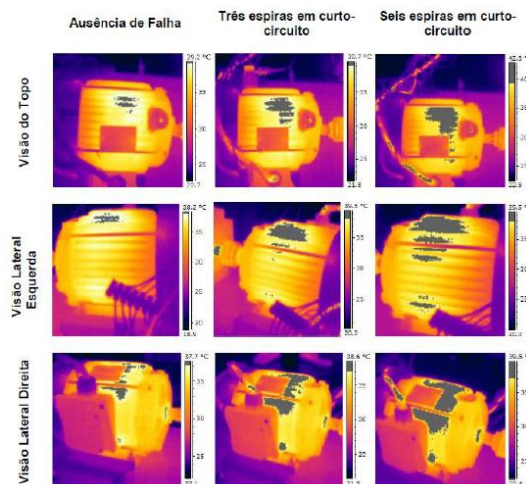
$$f_{cc} = \left[ n \pm \left( \frac{k}{p} \right) (1 - s) \right] f_e \quad \text{Eq. 42}$$

Onde  $f_e$  é a frequência de alimentação,  $s$  é o escorregamento dado pela Eq. 14,  $p$  é o número de pares de polos,  $n$  um inteiro ímpar e  $k$  um inteiro positivo.

Estas frequências são muitas vezes semelhantes às frequências apresentadas por outros danos, como a excentricidade [33], sendo muito importante distinguir as frequências provocadas por este dano das provocadas por outro qualquer.

### 5.10.3. Análise termográfica

A Figura 61 mostra o exemplo de um espectro termográfico que compara um motor saudável com um motor em curto-circuito, revelando-se o sobreaquecimento dos seus enrolamentos [12], bem como o aumento do gradiente de temperatura em zonas com maior gravidade.



**Figura 61** Comparação de um motor saudável (esquerda) com um motor em curto-circuito (meio e direita) através da análise termográfica <sup>55</sup>

<sup>55</sup> Retirado de [11]



## 5.11. Desequilíbrio de fases

### 5.11.1. Análise de vibrações

O desequilíbrio de fases traduz-se pelo aumento da amplitude das componentes a  $1 \times \text{RPM}$ ,  $2f_e$  e  $(2f_e \pm \frac{f_e}{3})$  e  $4f_e$  [11], [29].

### 5.11.2. Análise de corrente

Não foi encontrada sintomatologia para o presente dano na bibliografia analisada. Contudo, visto que o motor é trifásico supõem-se que o desequilíbrio de fases possa ser diagnosticado através da comparação dos valores de corrente das três fases existentes.

### 5.11.3. Análise termográfica

A alimentação desequilibrada do motor faz com que as suas correntes também estejam desequilibradas, levando à apresentação de um padrão térmico irregular nas três fases do motor [36].

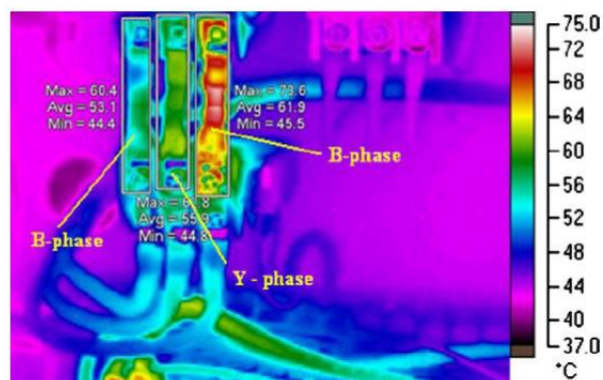


Figura 62 Exemplo de padrão térmico de desequilíbrio de carga em uma das fases <sup>56</sup>

<sup>56</sup> Retirado de [36]



## **6. Demonstração experimental**

O presente capítulo tem como objetivos verificar a veracidade das vantagens do controlo de condição em motores elétricos e aferir se é possível detetar variações nos seus parâmetros normais de funcionamento e, caso seja possível, verificar se estas estão em conformidade com a sintomatologia referida no capítulo 5.

### **6.1. Procedimento**

De modo a cumprir com os objetivos deste capítulo procuraram-se simular um conjunto de falhas específicas passíveis de ocorrerem em motores elétricos de indução. Esta tarefa foi concretizada pela utilização de motores com a presença de danos conhecidos e pela recolha de dados referentes aos métodos de análise de vibração, análise de corrente e análise termográfica.

Para evitar a utilização de equipamentos de análise profissionais dispendiosos utilizaram-se as funcionalidades do LabVIEW para a programação de dois analisadores, um de vibração e um de corrente, capazes de estabelecer comunicação entre o computador e os sensores utilizados, recorrendo-se à câmara termográfica para a análise termográfica.

A análise de vibração seguiu a seguinte sequência:

1. Colocação dos acelerómetros da forma mais conveniente à deteção do presente dano;
2. Medição de parâmetros em motor saudável;
3. Exportação dos dados de LabVIEW para Mathcad;
4. Implementação de dano próprio no motor ou substituição do motor saudável por motor danificado;
5. Medição de parâmetros em motor danificado;
6. Exportação dos dados de LabVIEW para Mathcad;
7. Elaboração dos devidos gráficos com dados recolhidos do motor saudável sobreposto pelos dados recolhidos do motor danificado;
8. Análise e discussão de resultados.

A análise de corrente seguiu a mesma sequência que a análise de vibrações, à exceção do primeiro ponto em que se utilizam os transformadores de corrente, sendo que estes devem ser instalados nos cabos de alimentação do estator do motor, entre o variador de frequência e o próprio motor, de modo a que cada transformador possua em si, unicamente, o cabo corresponde a uma das fases.

As camaras termográficas retiram valores absolutos de temperatura correta de um corpo através da introdução da sua emissividade e refletividade. Os métodos presentes nos anexos B e C estimam empiricamente estes valores. Contudo, as análises termográficas realizadas nesta dissertação focam-se em obter a comparação entre um estado de motor saudável e de motor danificado, interessando para isso a verificação de alteração aos parâmetros de temperatura dos motores, não sendo significativo os seus valores absolutos de temperatura. Assim sendo, a análise termográfica seguiu os seguintes passos:

1. Fixou-se um valor de temperatura de refletividade de 20°C e de emissividade de  $\varepsilon = 0,90$ ;
2. Deixou-se o motor saudável operar durante um determinado período de tempo;
3. Efetuaram-se as convenientes medições;
4. Deixou-se o motor arrefecer até a temperatura inicial;
5. Colocou-se o motor danificado ou implementou-se o dano no motor saudável;
6. Deixou-se o motor danificado operar durante o mesmo período de tempo que o motor saudável;
7. Efetuaram-se as convenientes medições.

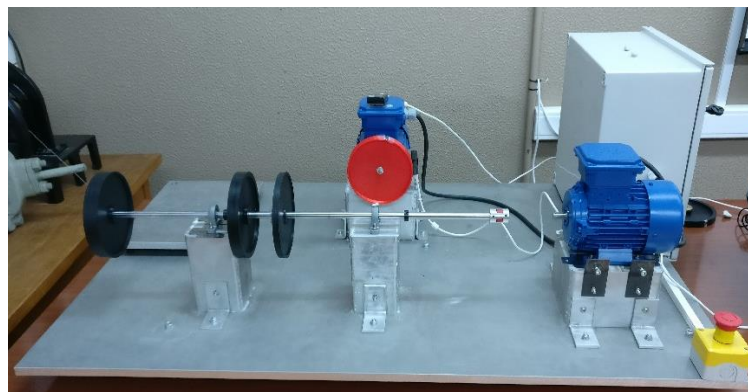
As medições em LabVIEW, exportadas para um ficheiro *Excel*, foram importadas para Mathcad, elaborando-se os devidos gráficos com os dados recolhidos do motor saudável, sobrepostos pelos dados recolhidos do motor danificado. Este tipo de apresentação ilustra nitidamente a comparação entre o motor saudável e o danificado, bem como o aumento significativo de determinadas frequências e amplitudes.

Tentou-se, sempre que possível, que nas medições efetuadas apenas estivesse em causa o presente dano, evitando-se interferências externas com o intuito de obter

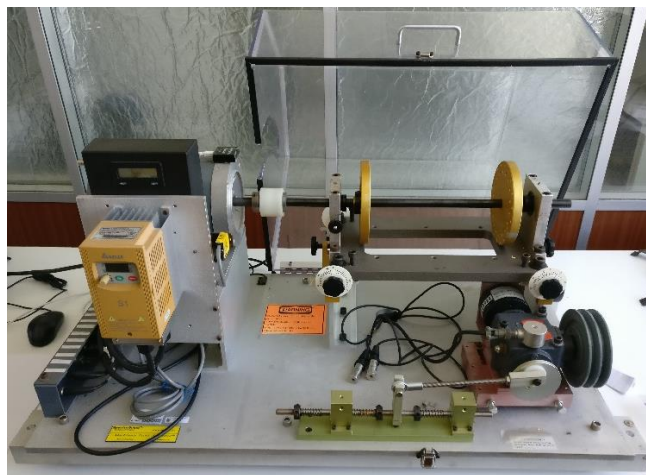
medições claras e facilitar a análise e a identificação de alterações aos parâmetros normais de funcionamento.

## **6.2. Equipamentos utilizados**

Os danos foram simulados utilizando-se os motores presentes na Figura 63, Figura 64 e Figura 65. Aos motores da Figura 63 e Figura 65 foram implementados danos passíveis de serem removidos, possibilitando que estes operem sob as suas condições normais de funcionamento evitando o seu deterioramento. Quanto à bancada presente na Figura 64 esta possui um conjunto de motores permanentemente danificados e um motor em boas condições, obrigando à troca e montagem dos mesmos consoante os objetivos de estudo.



**Figura 63 Simulador de técnicas de controlo de vibrações**



**Figura 64** Bancada didática *Spetraquest*



**Figura 65** Motor elétrico de indução em uma base metálica apoiada em quatro molas

### **6.2.1. Motores elétricos e variadores de frequência**

Os motores elétricos presentes na Figura 63 e Figura 65 são do mesmo modelo e possuem as características apresentadas na Tabela 4, enquanto os motores presentes na bancada da Figura 64 possuem as características apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 4** Características dos motores elétricos da Figura 63 e Figura 65

<b>Potência</b>	0,18 kW
<b>Rotor</b>	Gaiola de esquilo

<b>Número de barras</b>	22
<b>Polos</b>	4
<b>Cavas do estator</b>	24

**Tabela 5** Caraterísticas dos motores elétricos da Figura 64

<b>Potência</b>	0,37 kW
<b>Rotor</b>	Gaiola de esquilo
<b>Número de barras</b>	34
<b>Polos</b>	2
<b>Cavas do estator</b>	24

Todos os motores são alimentados por variadores de frequência (Figura 66). O variador de frequência é um controlador que tem a função de alimentar um motor elétrico com diferentes frequências, além dos 50 Hz da rede nacional, permitindo isto variar a sua velocidade de rotação.

A corrente de 50 Hz monofásica da rede nacional que entra no variador é convertida para uma corrente trifásica com um valor de frequência definido pelo utilizador. Esta corrente trifásica posteriormente alimenta o motor elétrico fazendo com que a velocidade síncrona do mesmo e, conseqüentemente, a sua rotação varie conforme os valores de frequência impostos pelo utilizador. Este pormenor tem implicação nas análises efetuadas, sendo desejável que a frequência de alimentação seja constante nas várias medições para que não existam oscilações na velocidade síncrona do motor e assim os danos não se manifestem de formas diferentes.



**Figura 66 Variador de frequência presente associado aos motores da Figura 63 e Figura 65 (à esquerda) e Variador de frequência e tacómetro da bancada presente na Figura 64 (à direita)**

### 6.2.2. Sensores

A elaboração da análise de vibração, da análise de corrente e da análise termográfica foi realizada por recorrendo-se a diferentes sensores capazes de comunicar com o computador através dos analisadores programados em LabVIEW.

Para a realização da análise de vibração utilizaram-se dois acelerómetros triaxiais da marca *Phidgets* cujas características se encontram discriminadas Tabela 6.

**Tabela 6 Características dos acelerómetros**

<b>Resolução da medição de aceleração</b>	976,7 $\mu\text{g}$
<b>Frequência de amostragem mínima</b>	1 Hz
<b>Frequência de amostragem máxima</b>	1000 Hz
<b>Resolução do conversor A/D</b>	16 bits
<b>Ligação</b>	USB

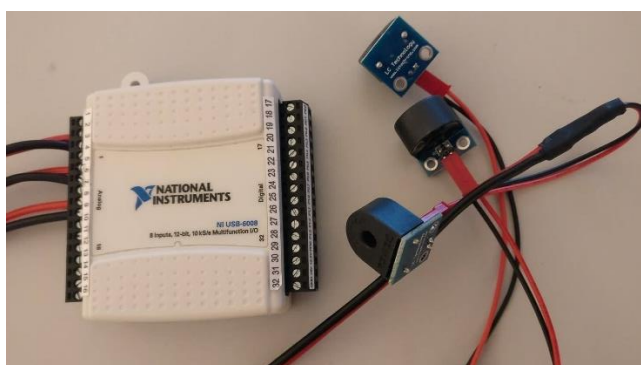
Os acelerómetros da *Phidgets* possuem placa de aquisição e filtro *anti-aliasing* embutidos, são fáceis de programar em LabVIEW e especialmente económicos.





**Figura 67 Acelerómetro *Phidgets***

Na análise de corrente utilizaram-se os transformadores de corrente e a placa de aquisição de dados da Figura 68, cujas características se encontram na Tabela 9.



**Figura 68 Placa de aquisição *National Instruments USB-6008* e transformadores de corrente**

**Tabela 7 Características da placa de aquisição**

<b>Nº de entradas analógicas</b>	8
<b>Nº de saídas analógicas</b>	2
<b>Nº de entradas/saídas digitais</b>	12
<b>Entrada analógica</b>	$\pm 10$ V
<b>Saída analógica</b>	0 V a 5 V
<b>Resolução</b>	12 bits

<b>Frequência de amostragem máxima</b>	10000 Hz
<b>Ligação</b>	USB

Os transformadores de corrente são capazes de medir corrente alternada até 5 A e têm uma saída analógica correspondente a  $\frac{5 A}{5 mA}$ . Estes transformadores devem ser instalados de forma a que o cabo correspondente a uma das fases passe no seu interior. A corrente que passa no cabo induz uma determinada tensão nos terminais do transformador que é facilmente convertida para valores de corrente devido a resistência conhecida de 200  $\Omega$  (código 201) existente na sua placa.

Quanto a análise termográfica foi utilizada a camara termográfica da Figura 69, cujas características se encontram na Tabela 8.



**Figura 69 Camara termográfica**

**Tabela 8 Características da camara termográfica**

<b>Modelo</b>	i50
<b>Faixa de medição</b>	-20°C a 350°C

<b>Sensibilidade térmica</b>	0,1°C a 25°C
<b>Gama espectral</b>	7,5µm a 13µm
<b>Frequência de fotogramas (<i>Frame Rate</i>)</b>	9 Hz
<b>Resolução térmica</b>	19600 pixels (140 x 140)

Ao longo do estudo efetuado, em situações especiais, foi utilizada a lâmpada estroboscópica a fim de aferir qual a velocidade de rotação do rotor do motor.

### **6.2.3. Analisadores programados em LabVIEW**

A programação de dois analisadores, um de vibração e um de corrente, foi a alternativa *low-cost* à utilização de aparelhos de medida profissionais. Os analisadores foram programados com base no estudo efetuado em torno do controlo de condição, da análise de vibração, da análise da assinatura de corrente do motor e da análise em frequência.

#### **6.2.3.1. Analisador de vibrações**

O analisador de vibrações possui duas funcionalidades principais. A primeira é destinada à deteção de anomalias e a segunda ao diagnóstico das mesmas.

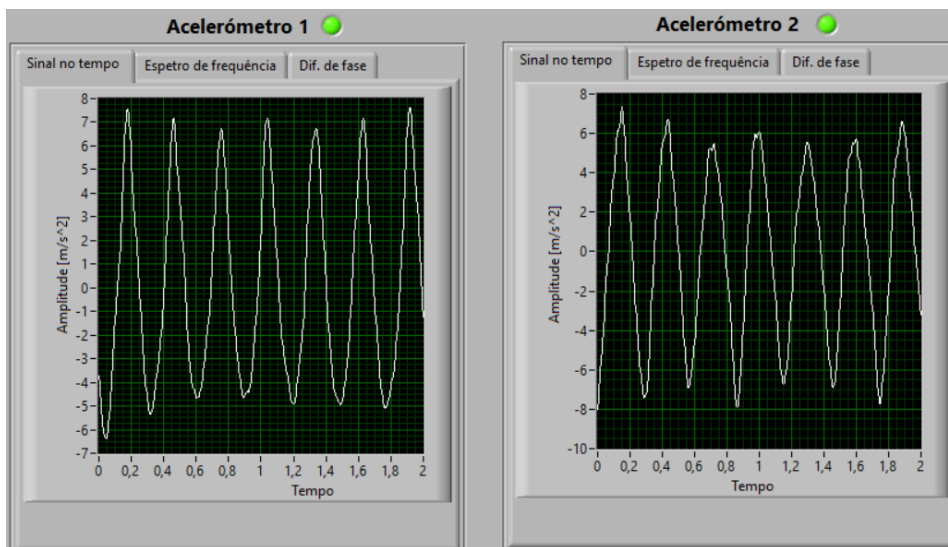
A deteção é efetuada com base nas normas programadas ISO 10816 e DNV-GL, no que é referente a motores elétricos. Os acelerómetros medem os níveis de vibração dos pontos específicos em que são colocados. Estes valores são adquiridos e processados resultando em um indicador posteriormente comparado com a norma escolhida pelo utilizador. Os resultados da comparação dos níveis de vibração medidos com as respetivas normas resultam na ação de um *led* que se acende indicando ao utilizador se o nível de vibração é classificado como bom, aceitável, insatisfatório ou inaceitável, para a norma

definida. Isto acontece de forma independente para cada um dos acelerômetros (1 e 2) e consequentemente para cada um dos dois pontos de medida em que estes são colocados.



**Figura 70 Analisador de vibrações - Detecção de anomalias por comparação com normas**

O diagnóstico é efetuado essencialmente com base no conhecimento e experiência do utilizador. O sinal analógico de vibração adquirido pelos acelerômetros é convertido em sinal digital e processado, visualizando-se o sinal no tempo. As bibliotecas existentes em LabVIEW, como o *sound and vibrations analysis*, permitem muito facilmente manipular o sinal no tempo, obtendo-se o espectro frequências e o espectro de fases pela aplicação da FFT.



**Figura 71 Analisador de vibrações - Display da informação fornecida pelos acelerómetros**

Posto isto, através da análise do sinal no tempo, do espectro de frequências e da relação de fases é possível efetuar o diagnóstico.



**Figura 72 Analisador de vibração**

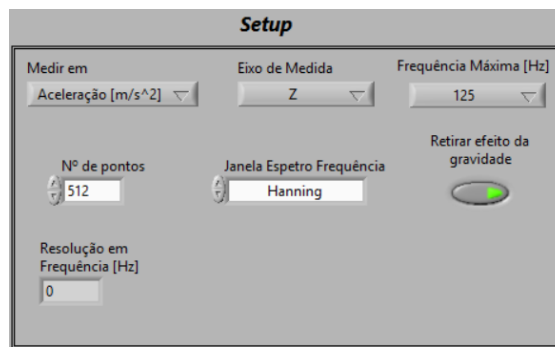
De modo a facilitar o diagnóstico foi programada a opção de serem traçadas linhas verticais nas frequências específicas de cada dano, tendo por base a sintomatologia recolhida na bibliografia e apresentada no capítulo 5. Esta funcionalidade permite ao utilizador não só visualizar estas frequências como visualizar harmónicas, interarmónicas e subarmónicas da frequência indicada pelo cursor do gráfico. Esta funcionalidade tenciona diminuir o tempo despendido pelo analista na procura das frequências típicas e diminuir a ambiguidade existente na análise dos espectros quando existem muitas outras frequências não associadas diretamente ao dano existente.

O analisador está programado para funcionar com dois acelerómetros *Phidgets*. A programação de dois acelerómetros é vantajosa uma vez que permite observar simultaneamente os níveis de vibração em dois pontos distintos do motor e utilizar um dos acelerómetros como referência, possibilitando a visualização da diferença de fase entre dois pontos do motor, fornecendo uma imagem do movimento relativo entre diferentes pontos do mesmo, tornando-se um fator determinante no diagnóstico e distinção de danos com sintomas semelhantes.

Uma vez que os acelerómetros em questão são triaxiais, também se programou a possibilidade de visualizar, em gráfico, a diferença de fase entre dois eixos de medição do mesmo acelerómetro, com o intuito de, para o mesmo ponto de medição, obter uma imagem da mobilidade do motor nestes mesmos eixos.

Os acelerómetros utilizados possuem *input's* que devem ser fornecidos e controlados para a obtenção da informação correta e esperada. Com isto, antes de se

iniciar cada análise é necessário indicar ao sistema, o parâmetro e eixo de medição pretendido, a frequência máxima a medir e o número de pontos de aquisição. O fornecimento desta informação ao sistema permite definir as variáveis necessárias a cada sistema de aquisição e processamento de sinal como a resolução em frequência, a resolução no tempo e o período e frequência de amostragem



**Figura 73 Setup analisador de vibrações**

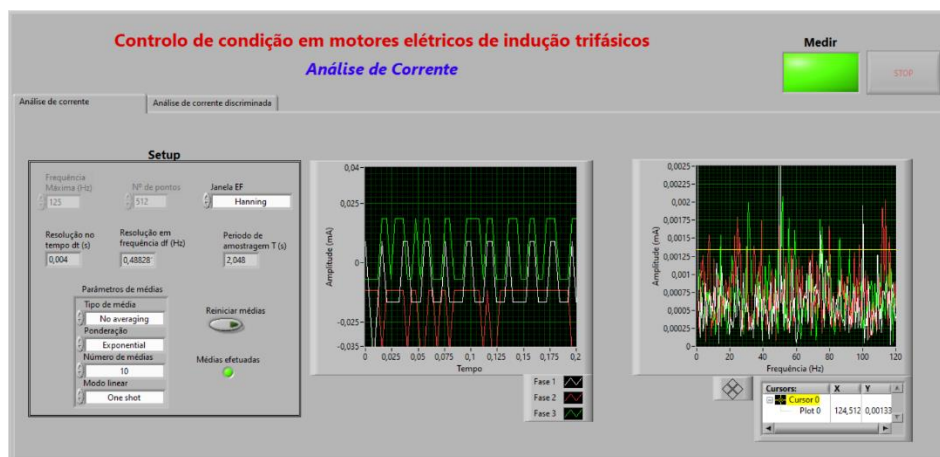
Como a análise de vibrações possui muitas variáveis capazes de comprometer os resultados obtidos tentou-se ter em conta o máximo de várias possíveis. O erro de *Aliasing* é atenuado pelo filtro *anti-aliasing* presente no próprio acelerómetro e pela apresentação de metade da frequência máxima capaz de ser detetada pelo mesmo, o erro de *Leakage* é controlado através da utilização de uma janela adequada, o efeito da aceleração gravítica é eliminado pela subtração da média dos valores medidos a cada conjunto de valores adquiridos e a realização de médias aos espectros tornam os espectros obtidos mais claros e livres de ruídos pontuais.

O maior desafio na programação do presente analisador foi a interpretação das funções da biblioteca presente em LabVIEW e programação do cálculo da fase, bem como manter o processamento do programa suficientemente rápido para que este fosse capaz de responder a mínima perturbação do acelerómetro.

#### **6.2.3.2. Analisador de corrente**

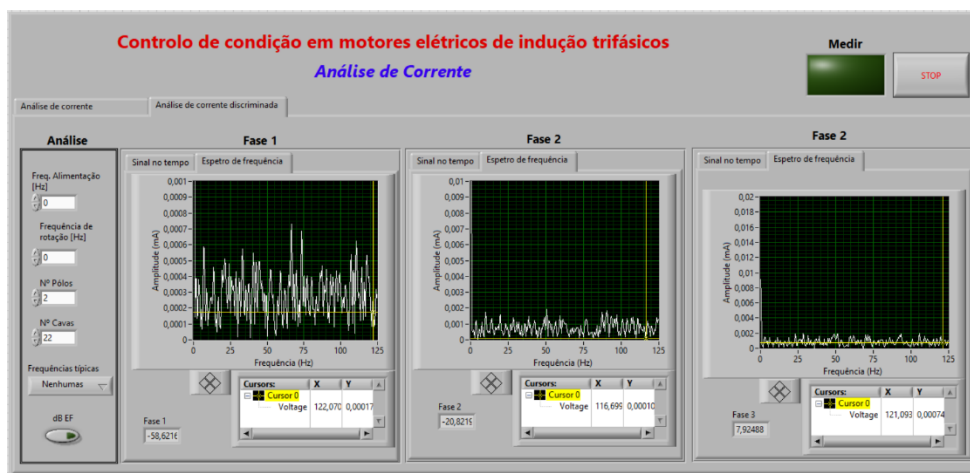
A programação do analisador de corrente seguiu um racional semelhante ao analisador de vibração, visto que a análise de corrente também se baseia na análise em frequência.

Três transformadores de corrente, ligados a uma placa de aquisição de dados, captam o sinal no tempo da corrente presente em cada uma das fases que alimenta o motor elétrico. Cada fase fornece um sinal no tempo distinto que é transformado para o domínio da frequência através da aplicação da FFT.



**Figura 74 Analisador de corrente**

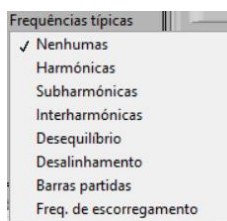
Os sinais, tanto no tempo como em frequência, podem ser visualizados todos num só gráfico permitindo a comparação direta das três fases (Figura 74) ,ou cada fase pode ser visualizada independentemente permitindo a sua análise detalhada (Figura 75). Torna-se assim possível visualizar quais as frequências presentes no sinal de forma mais nítida, alterar a escala para escala logarítmica de forma a realçar as frequências de baixa amplitude (situação bastante comum na análise de corrente) e verificar o valor de fase para cada frequência específica pela utilização do cursor do espectro de frequência.



**Figura 75 Analisador de corrente para as 3 fases**

Visto tratar-se de um sistema de aquisição de dados, à semelhança do analisador de vibração, também aqui é necessário fornecer *input's* ao sistema para realização de uma correta aquisição e processamento de sinal, indicando-se essencialmente a frequência máxima a considerar e o número de pontos que se pretendem adquirir. Também aqui o erro de *Aliasing* é evitado por apenas se considerar metade da frequência de amostragem, o erro de *Leakage* pela aplicação de janelas adequadas e a obtenção de espectros limpos e claros pela realização de médias de espectros.

O analisador de corrente é relativamente menos complexo do que o analisador de vibração, este não possui distinção entre funcionalidades destinadas à deteção e ao diagnóstico. Isto acontece por não se ter conhecimento de normas que regulamentem os valores de corrente admissíveis em motores elétricos, ao contrário do que acontece com a análise de vibrações. A deteção neste caso deverá ser efetuada pela alteração aos valores das medições anteriores. Contudo, manteve-se a capacidade de serem traças as frequências típicas de dano com base na bibliografia estudada com o objetivo de facilitar o diagnóstico.



**Figura 76 Analisador de corrente - Frequências típicas de dano programadas**

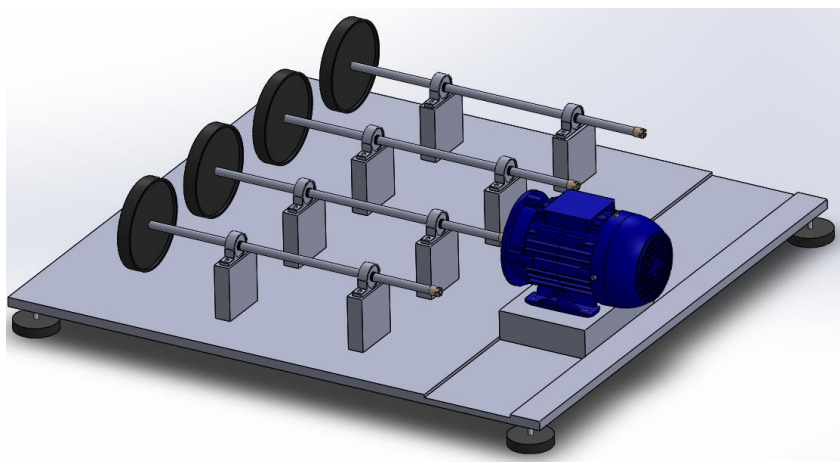
### **6.3. Idealização de bancada didática para controlo de condição em motores elétricos de indução**

O projeto de uma bancada didática tem como objetivos possibilitar a análise de diferentes tipos de danos através de variadas técnicas de análise, difundir os conceitos inerentes a estas e desenvolver novas ferramentas para deteção, diagnóstico e correção de danos em motores elétricos de indução.

Desta forma, os conhecimentos teóricos nas áreas da gestão da manutenção, vibrações mecânicas e máquinas elétricas poderão ser reforçados com a atividade experimental. Deste modo, idealizou-se a bancada presente na Figura 77 de modo a



combater o problema de falta de diversidade e dificuldade em encontrar recursos que possibilitem a análise experimental nas áreas enunciadas na Escola Naval.



**Figura 77 Projeto de bancada didática para controlo de condição em motores elétricos de indução**

A bancada idealizada consiste em um motor elétrico, alimentado por um variador de frequência, assente em um bloco metálico que corre numa calha presente na base metálica de modo a acoplar quatro linhas de veios distintas, cada uma apoiada em duas chumaceiras, com um disco de carga na sua extremidade e capaz de simular variados danos como desequilíbrio, desalinhamento e empeno. Utilizando-se as ligações elétricas do motor ou substituindo-o, é possível simular desequilíbrio e perda de fase, curto-circuito, barras partidas, sobrecarga, etc. À base metálica são aplicados apoios isoladores de vibração, de modo a reduzir a transmissão de vibrações indesejadas e prejudiciais às análises e medições efetuadas.

Ao longo da dissertação contribuiu-se para a sua construção através das seguintes ações:

- Elaboração dos desenhos técnicos da base metálica (Apêndice C), do bloco metálico (Apêndice E) e da base para as chumaceiras (Apêndice E) tendo-se em conta as medidas do motor elétrico (Anexo D) e das chumaceiras *Phidjets* utilizadas (Anexo E). Projetando-se as medidas da bancada considerando-se a necessidade de o motor elétrico possuir o seu eixo perfeitamente alinhado com o eixo das chumaceiras e consequentemente a linha de veios;

- Aquisição de grande parte do material necessário à sua construção (motor elétrico, variador de frequência, chapa de aço, blocos de aço e veios);
- Encomenda *online* de acoplamentos *Phidgets*, chumaceiras *Phidgets* e apoios isoladores de vibração;
- Impressão de esboço de disco de carga em impressora 3D;
- Maquinação da base metálica, bloco de apoio do motor e base para as chumaceiras de acordo com as medidas projetadas;
- Aplicação de barreira física (verniz) contra a corrosão ao material metálico.

O material metálico adquirido foi o aço, pelo facto de ter sido adquirido gratuitamente. O alumínio seria a escolha mais correta pelo fato de ser mais leve e não apresentar problemas de oxidação.

A existência de componentes *standart* como acoplamentos e chumaceiras comercializados por várias empresas permite que o processo de fabrico se torne mais célere uma vez que evita a realização de cálculos como a resistência do material a torção, ou outro tipo de esforço. Contudo, o processo de entrega poderá ser demorado, uma vez que o material é maioritariamente adquirido *online* e está armazenado em vários pontos do mundo, tendo sido o atraso na entrega das chumaceiras e acoplamentos que impossibilitou que a bancada estivesse totalmente construída à data de entrega da presente dissertação.

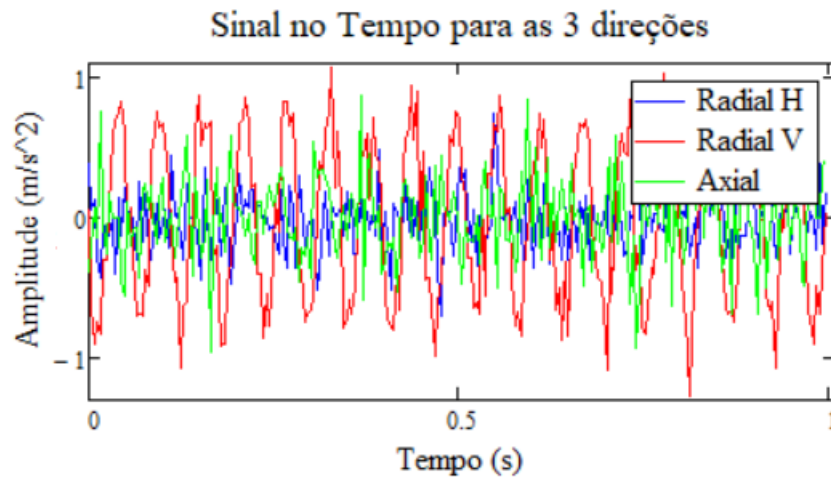
## **6.4. Análise de Resultados**

### **6.4.1. Desequilíbrio**

Num motor elétrico é mais provável a ocorrência de desequilíbrio na situação de rotor suspenso, por exemplo por desequilíbrio na ventoinha do motor, do que na situação de rotor apoiado, suscetível de ocorrer em linhas de veios. Por este motivo, utilizando-se o motor da Figura 65 simulou-se o caso de desequilíbrio em rotor suspenso aplicando-se um conjunto de massas de desequilíbrio (Apêndice B).

#### 6.4.1.1. Análise de vibrações

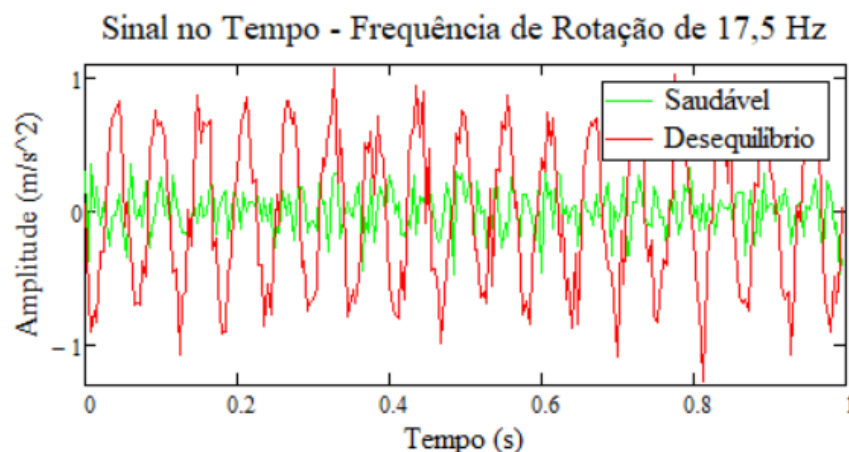
O motor em estudo está assente em uma placa metálica apoiada por 4 molas em uma outra placa metálica. De forma a compreender-se em qual dos eixos é que o motor apresenta uma maior mobilidade foram efetuadas medições nos três eixos (Figura 78) após introdução de uma massa de desequilíbrio.



**Figura 78 Amplitude de vibração nas 3 direções para o caso de desequilíbrio**

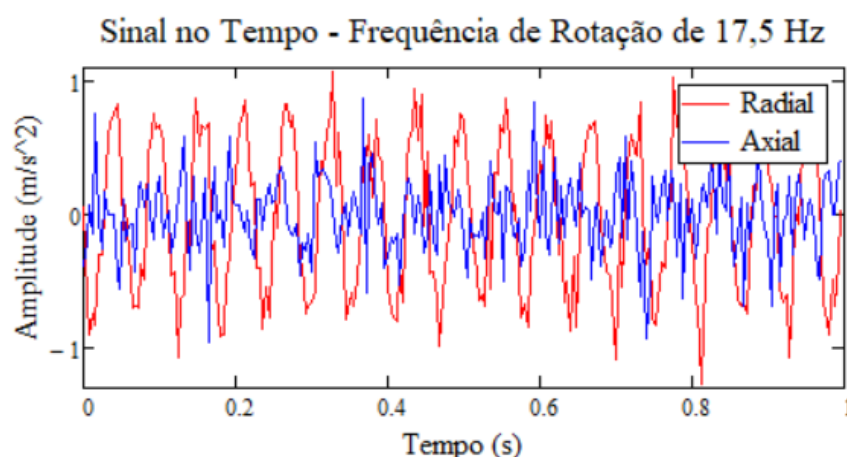
Concluindo-se que o modelo utilizado apresenta maior amplitude de vibração na direção radial vertical e amplitude semelhante nas direções radial horizontal e axial. Uma vez que a vibração radial vertical é a que mais se faz sentir tomou-se esta como referência para a vibração radial.

Posto isto, efetuaram-se medições na direção radial para os casos de motor saudável e motor desequilibrado, verificando-se que os níveis de vibração aumentam na existência de desequilíbrio (Figura 79). O motor saudável apresenta um nível de vibração muito inferior ao do motor desequilibrado.



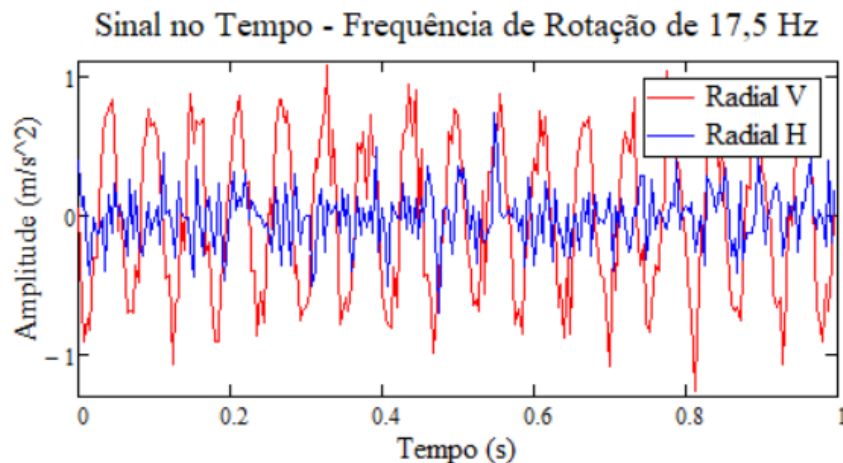
**Figura 79** Comparação do nível de vibração entre o motor saudável e o motor desequilibrado para o caso de rotor suspenso

Apesar de a vibração radial ser superior à axial e, sendo este um caso de rotor suspenso, verifica-se a existência significativa de vibração axial (Figura 80) tal como referido em 5.1.1.



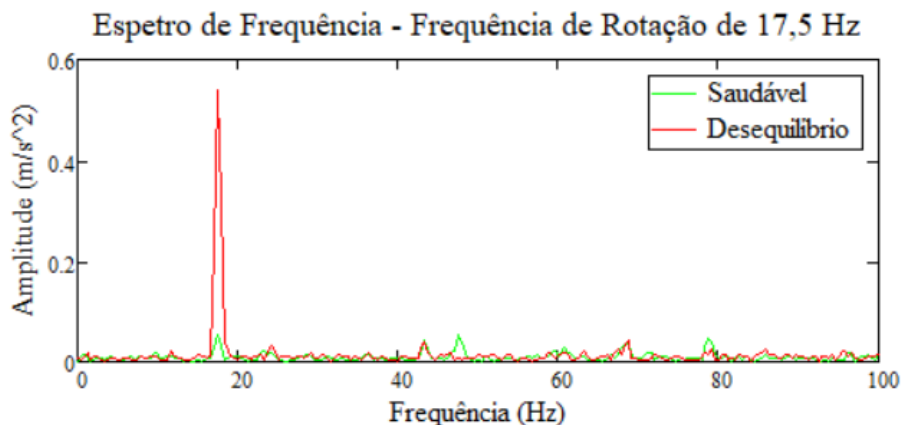
**Figura 80** Comparação entre a vibração radial e axial para caso de desequilíbrio em rotor suspenso

Relativamente à vibração radial, seria de esperar que esta fosse semelhante nas direções vertical e horizontal devido à manifestação da força centrífuga gerada pelo desequilíbrio. Contudo, verificou-se que a direção vertical apresenta maior nível de vibração que a direção horizontal, tal como demonstrado na Figura 81. Este acontecimento pode ser justificado pela montagem do motor que confere uma maior mobilidade na direção vertical do que horizontal.



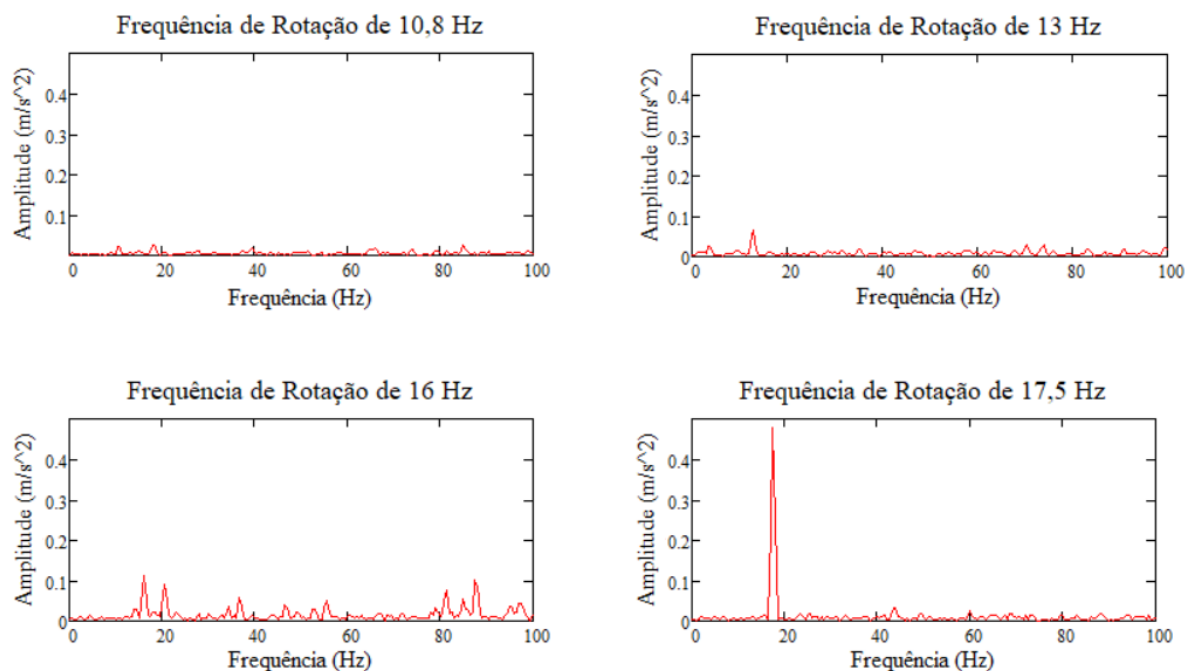
**Figura 81 Comparação entre a vibração horizontal e vertical para o caso de desequilíbrio em rotor suspenso**

Quanto ao espectro de frequência verifica-se claramente que o desequilíbrio origina um aumento significativo da componente a 1xRPM cuja amplitude se mantém estável, também sendo possível observar o aparecimento de pequenas harmônicas, indicativas de desequilíbrio severo.



**Figura 82 Comparação do espectro de frequência entre o motor saudável e o motor desequilibrado para o caso de rotor suspenso**

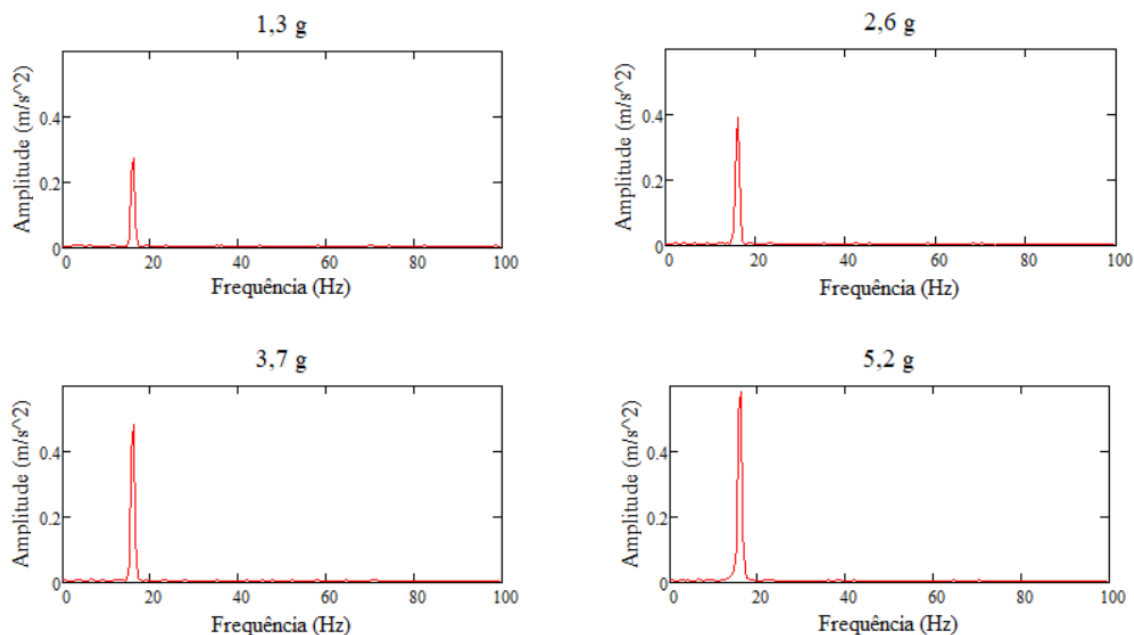
Verifica-se também que, variando-se a frequência de rotação através do variador de frequência e mantendo-se a massa de desequilíbrio (5,2 g), o desequilíbrio se faz sentir quanto maior for a frequência de rotação, Figura 83.



**Figura 83** Evolução da componente 1xRPM conforme a frequência de rotação do motor

Baixas rotações tornam a componente a 1xRPM menos perceptível, camuflando-a no ruído de chão do espectro.

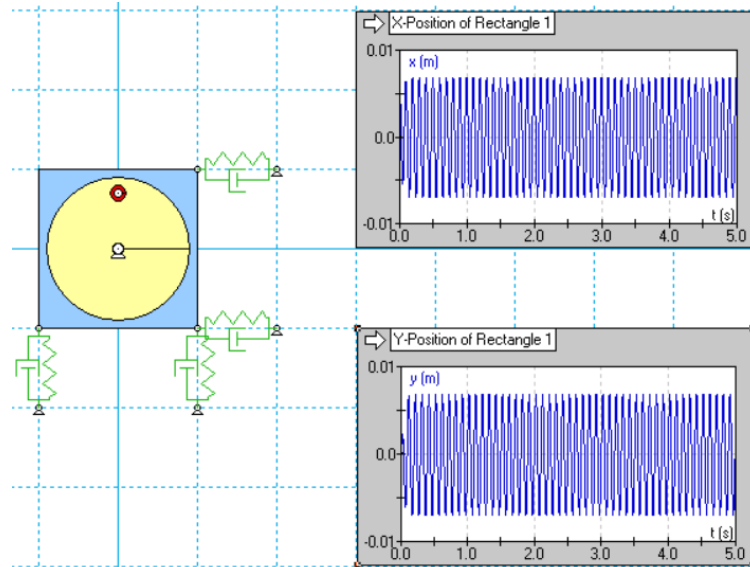
O mesmo acontece para o aumento da massa de desequilíbrio. Manteve-se o motor a rodar a 16 Hz, contudo realizaram-se 4 medições com massas de desequilíbrio diferentes. Obtendo-se os resultados da Figura 84 que provam que quanto maior for a massa de desequilíbrio maior a amplitude da componente a 1xRPM.



**Figura 84** Evolução da componente 1xRPM conforme o aumento da massa de desequilíbrio

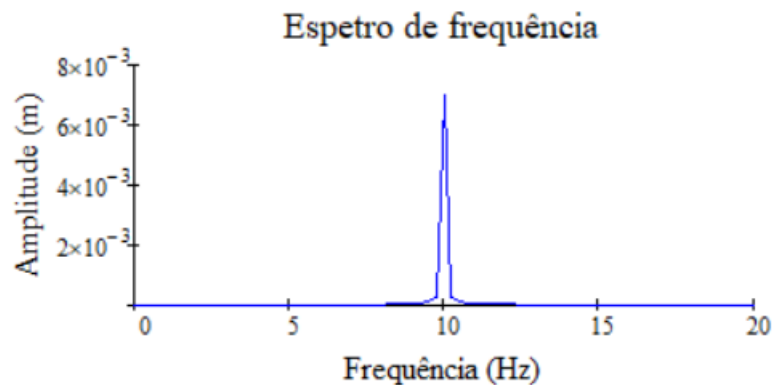
Quanto à fase houve uma grande dificuldade em encontrar valores de fase concordantes com a bibliografia. Daqui surgiu a questão da influência da mobilidade do motor nos diferentes eixos nos valores de fase observados, tendo-se pensado que o facto de o motor possuir um maior grau de liberdade em determinado eixo poderá afetar o movimento relativo do mesmo entre eixos e consequentemente adulterar os valores de fase observados.

A fim de aferir a veracidade deste pensamento efetuou-se uma simulação computacional de desequilíbrio através do software WorkingModel. Desenhou-se o motor da Figura 85 constituído pela carcaça, rotor e massa de desequilíbrio. O motor foi fixado por 4 apoios com valores de amortecimento e rigidez tais que este apresentasse o mesmo nível de vibração nas direções vertical e horizontal, representando isto um mesmo grau de mobilidade em ambos os eixos.



**Figura 85 Simulação de desequilíbrio em *WorkingModel***

O motor foi colocado em funcionamento à frequência de rotação de 10 Hz. De modo a eliminar a influência das frequências naturais do motor no sinal foi atribuído um valor de amortecimento exagerado aos apoios, garantindo-se assim que o motor apenas fosse excitado pela sua frequência de rotação (Figura 86) não existindo interferência de frequências naturais.

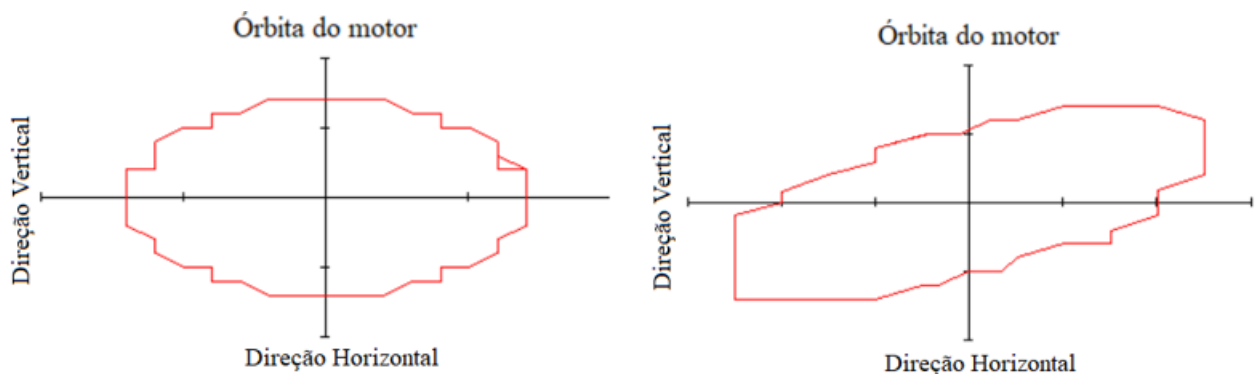


**Figura 86 Desequilíbrio - Espectro de frequência obtido para a direção vertical através de simulação em *WorkingModel***

O amortecimento de todos os apoios foi mantido constante ao longo da simulação. Contudo, variou-se a rigidez dos apoios na direção horizontal, diminuindo-a progressivamente com o intuito de simular um maior grau de mobilidade neste eixo, aproximando o modelo da realidade. A expressão da diferença de mobilidade entre os eixos pode ser verificada através da Figura 87, onde é apresentada a comparação da órbita

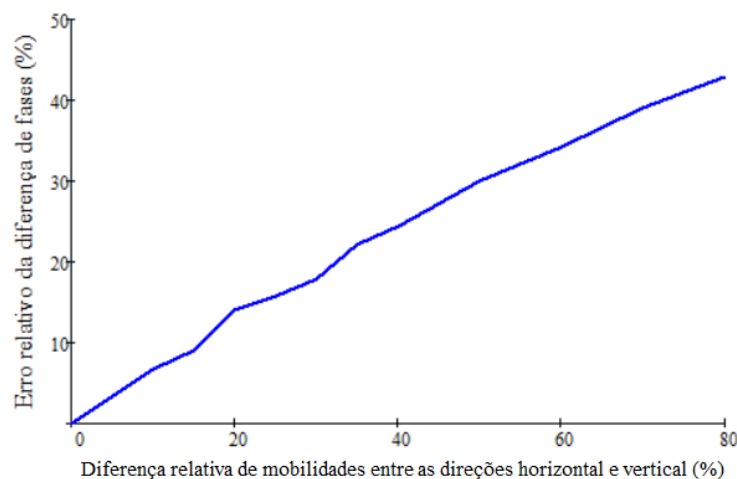


do motor quando este possui o mesmo grau de liberdade em ambas as direções e quando possui maior mobilidade na horizontal.



**Figura 87 Simulação informática - Órbita do motor para diferença de mobilidades de 0 % (à esquerda) e de 80 % (à direita)**

Assumiu-se como diferença de fase para a situação de igual mobilidade em ambos os eixos o valor de  $90^\circ$ . À medida que se variou a rigidez verificou-se a diferença de fase entre os eixos, obtendo-se os resultados presentes na Figura 88, em que o eixo das abcissas representa a diferença relativa de mobilidade entre as direções horizontal e vertical, isto é, quão diferente é a mobilidade na direção horizontal comparativamente à direção vertical, e no eixo das ordenadas o erro relativo da diferença de fases, ou seja, quanto é que a diferença de fases se afasta de  $90^\circ$  à medida que a diferença de mobilidades aumenta.



**Figura 88 Relação entre a mobilidade dos eixos e a diferença de fase nos mesmos**

Conclui-se com esta simulação que, existindo mobilidades diferentes nos diferentes eixos a variação de fase se afasta dos valores teóricos apresentando um erro relativo que varia de forma aproximadamente linear com a variação de mobilidades nos

eixos. Assim, a fase faz-se acompanhar pelo transdutor unicamente na situação em que o motor apresenta a mesma mobilidade entre eixos, o que na realidade é uma situação difícil de alcançar devido aos diferentes tipos de fixação das máquinas.

De modo genérico, conclui-se que o desequilíbrio pode ser facilmente detetado pela análise de vibração, sendo o seu diagnóstico tanto mais fácil quanto mais severo for o desequilíbrio.

#### 6.4.1.2. Análise de corrente

A análise de corrente foi efetuada tendo-se colocado um transformador de corrente em uma das fases (Apêndice B).

Quanto ao sinal no tempo, representante da corrente que alimenta o motor, não se verificaram alterações entre o estado de motor saudável e de motor danificado. Verificou-se que a corrente que alimenta o motor é praticamente harmónica e que mantém a amplitude nos dois estados.

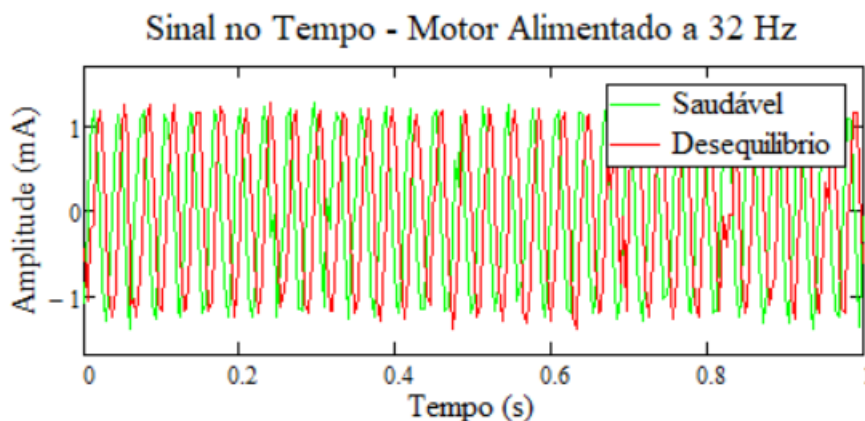
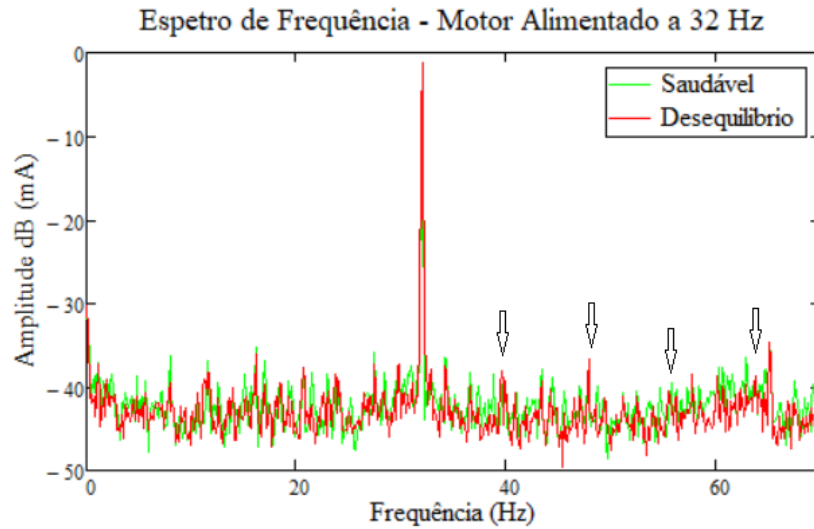


Figura 89 Análise de corrente - Sinal o tempo para o caso de desequilíbrio

Quanto ao espectro de frequência, foi aplicada a escala logarítmica para que fosse possível realçar as baixas frequências (comparativamente à frequência de alimentação), obtendo-se os resultados da Figura 90.



**Figura 90** Análise de corrente - Espetro de frequência para o caso de desequilíbrio

As setas presentes no gráfico representam as frequências típicas de dano dadas pela Eq. 22 que se deveriam manifestar com a existência de desequilíbrio. Contudo, verifica-se não existir alterações significativas ao espectro do motor em estado saudável aquando a existência de desequilíbrio. Verificando-se também que o ruído de chão é ligeiramente superior quando o motor é saudável, apesar de existir um aumento de amplitude da frequência de alimentação do motor na existência de desequilíbrio.

A semelhança entre os espectros poderá ser justificada pela existência de excentricidade dinâmica no rotor, muito difícil de eliminar por completo, e pelo facto da análise de corrente ser muito sensível à mesma. No entanto, conclui-se que dificilmente se irá conseguir diagnosticar o desequilíbrio pela análise de corrente.

#### **6.4.1.3. Termografia**

De acordo com o procedimento utilizado para a simulação do presente dano não se previu alterações na temperatura do motor, não se considerando necessário efetuar a análise termográfica.

#### 6.4.2. Desaperto

A situação de desaperto foi simulada tendo-se desapertado os apoios do motor da Figura 91.



**Figura 91** Fixação do motor à base metálica

Efetuaram-se medições em 3 casos: para todos os apoios apertados, para 1 apoio desapertado e para 2 apoios desapertados.

Sem a realização de qualquer análise concluiu-se imediatamente que motores em funcionamento com apoios desapertados tendem a aumentar o nível de desaperto e que devido aos choques aleatórios causados pelo mesmo pode ocorrer a fratura destes. Verificou-se que, deixando o motor operar com apoios desapertados, o desaperto destes aumentou, os apoios inicialmente apertados desapertaram-se e que um dos apoios chegou a partir devido à fadiga, tendo sido necessário encontrar uma solução paliativa (fixação com porca e contraporca) que possibilitasse a fixação do motor.



**Figura 92** Apoio partido por fadiga devido a desaperto

#### 6.4.2.1. Análise de vibrações

Geralmente, as máquinas horizontais apresentam maior vibração horizontalmente. Contudo, como será de esperar, isto varia conforme a fixação dos apoios, tendo-se verificado para o presente caso específico que os níveis de vibração nas 3 direções são influenciados pelo desaperto existente.

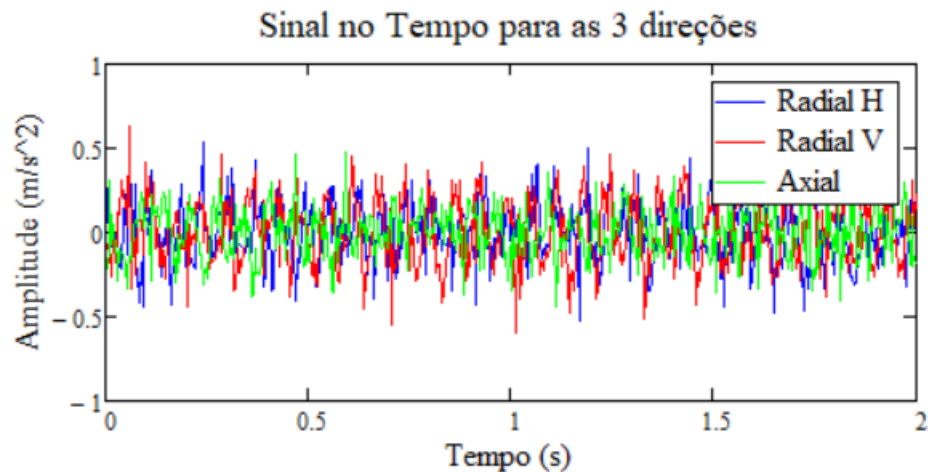


Figura 93 Amplitude de vibração nas 3 direções para o caso de 1 apoio desapertado

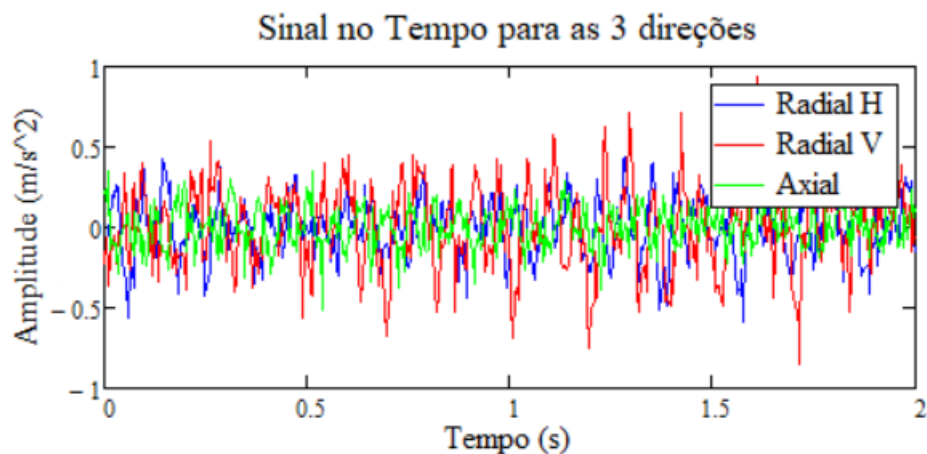
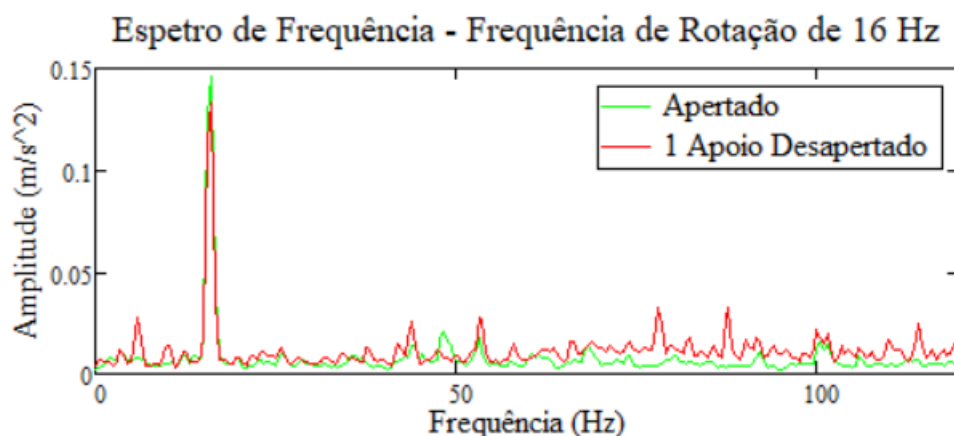
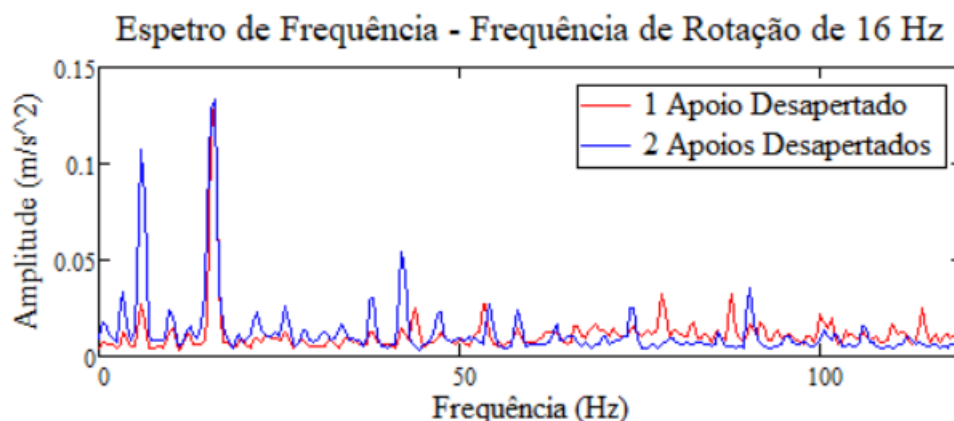


Figura 94 Amplitude de vibração nas 3 direções para o caso de 2 apoios desapertados

Visto que a amplitude de vibração é praticamente semelhante em todas as direções, efetuou-se a análise espectral na direção vertical, por comodidade na fixação dos acelerómetros, por ser a direção que apresenta um ligeiro aumento quando o desaperto se intensifica e por ser a direção recomendada de análise, obtendo-se os espectros da Figura 95 e Figura 96.



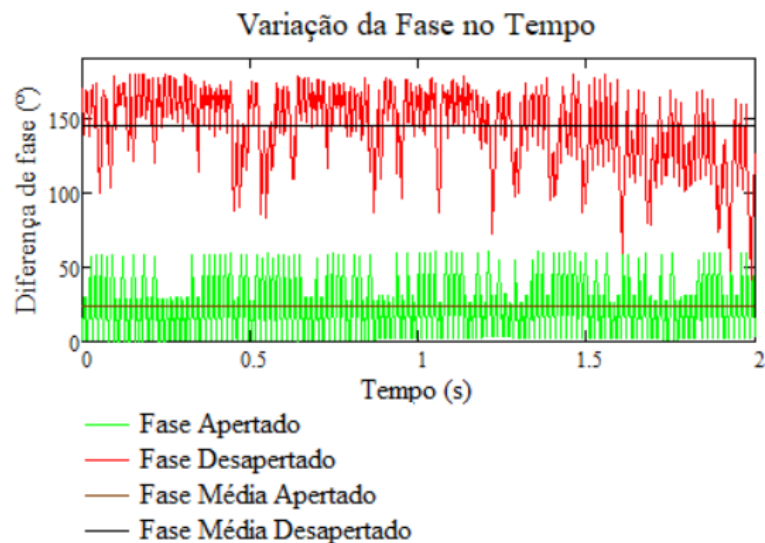
**Figura 95** Comparação entre espectros para apoios apertados e 1 apoio desapertado



**Figura 96** Comparação entre espectros para 1 apoio desapertado e 2 apoios desapertados

Os presentes espectros confirmam que o desaperto origina espectros diferentes conforme o grau de desaperto. Contudo, a componente dominante a 1xRPM é igual nos vários espectros, diferenciando-se estes pelo aumento do ruído de chão e o aparecimento de harmónicas, subarmónicas e interarmónicas à medida que o desaperto se intensifica.

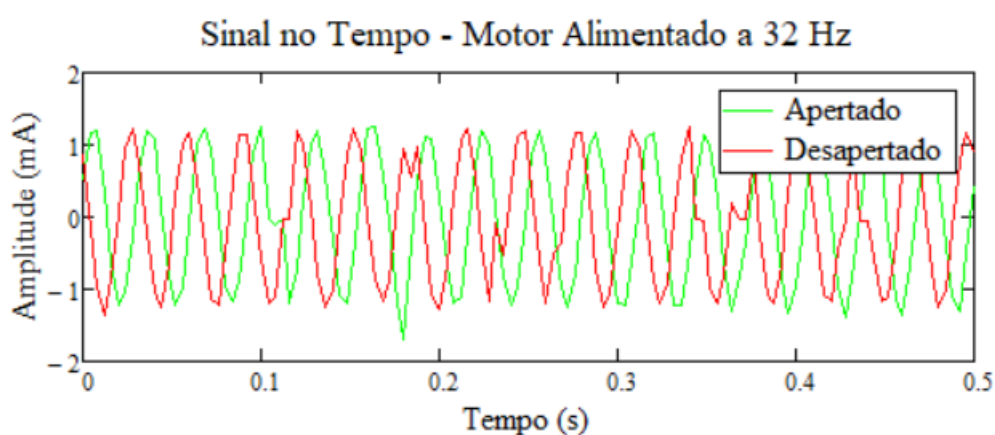
Realizou-se a medição da diferença de fase entre o apoio do motor e a base, na direção vertical, para os casos de motor apertado ou desapertado. Onde se aferiu que, na situação de apoios devidamente apertados, a diferença de fase varia de forma relativamente estável possuindo um valor médio de 24°. Enquanto, para a situação de apoios desapertados, a variação de fase se apresenta mais aleatória possuindo um valor médio de 144°. Estes dados confirmam o enunciado em 5.4.1 e estão expressos na Figura 97.



**Figura 97** Variação da fase no tempo para as situações de apoios apertados e apoios desapertados

#### 6.4.2.2. Análise de corrente

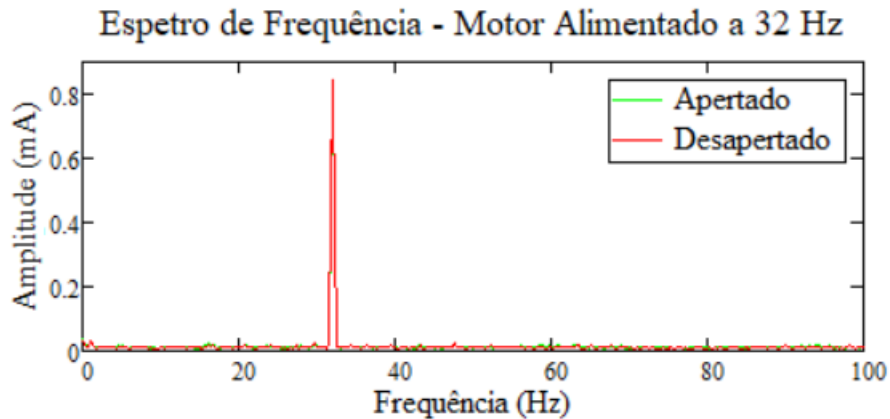
Através da simulação de desaperto severo verificou-se não existirem alterações à corrente de alimentação do motor. A Figura 98 mostra que as amplitudes de corrente se mantêm constantes e igualmente harmónicas para os dois casos. A desfasagem entre os sinais é justificada pelo facto de estes terem períodos de aquisição diferentes, não devendo esta ser considerada com uma alteração aos padrões de funcionamento do motor.



**Figura 98** Análise de corrente - Sinal o tempo para o caso de desaperto

Os espectros de frequência da Figura 99 comprovam que o desaperto de apoios não provoca qualquer alteração na corrente do motor. A frequência de alimentação de 32 Hz é a única frequência que se manifesta no espectro, sendo o espectro bastante limpo com

todas as restantes frequências com amplitudes muito próximas de zero. A total coincidência dos espectros faz com que estes ao serem sobrepostos seja difícil a identificação do espectro do motor com os apoios devidamente apertados.



**Figura 99** Análise de corrente - Espectro de frequência para o caso de desaperto

Tal como esperado, verificou-se que a análise de corrente não é adequada para diagnóstico de desaperto.

#### **6.4.2.3. Termografia**

Verificou-se que a manifestação física da simulação de desaperto de apoios consiste no balanço aleatório do motor refletido em choques espontâneos dos apoios na base de fixação do mesmo. Este acontecimento não pressupõe o aquecimento dos componentes internos do motor, não se considerando necessária a realização da análise termográfica.

#### **6.4.3. Desequilíbrio de fases**

Simulou-se o desequilíbrio de fases, alterando-se a amplitude da corrente de uma das fases pela introdução do reóstato da Figura 100 em série com a mesma. Isto provoca uma alimentação deficiente desta fase comparativamente às restantes.





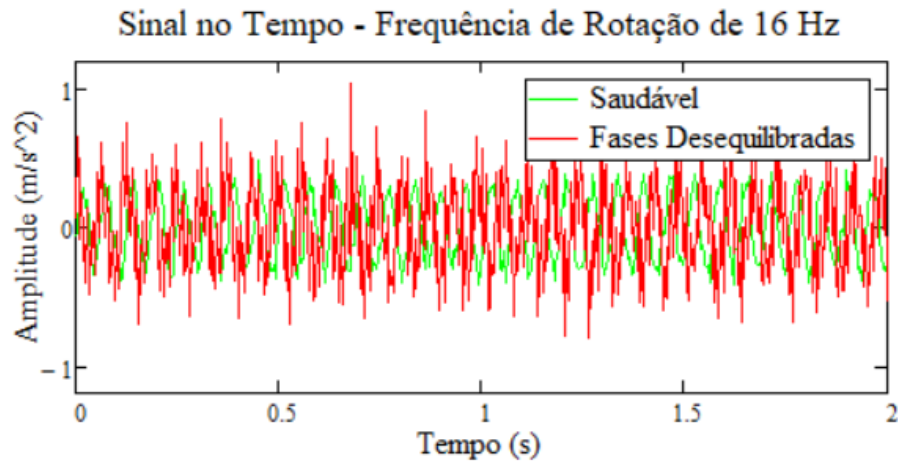
**Figura 100 Motor com reóstato em série com uma das fases**

Sensorialmente, não se verificou manifestação nenhuma da existência deste dano, o motor continuou a arrancar normalmente e não se verificaram ruídos anormais.

#### **6.4.3.1. Análise de vibrações**

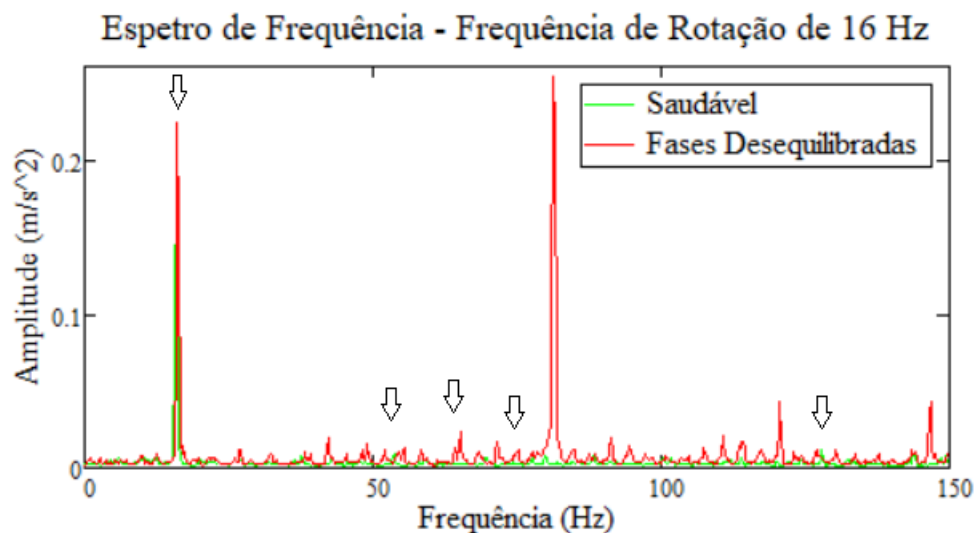
O motor foi alimentado pelo variador de frequência por 32 Hz, que devido às características do motor, se traduz numa frequência de rotação de 16 Hz. O desequilíbrio de fases foi concretizado pela aplicação de 90  $\Omega$  de resistência a uma das fases.

Na direção radial, verifica-se o aumento nos níveis de vibração quando o motor opera com fases desequilibradas.



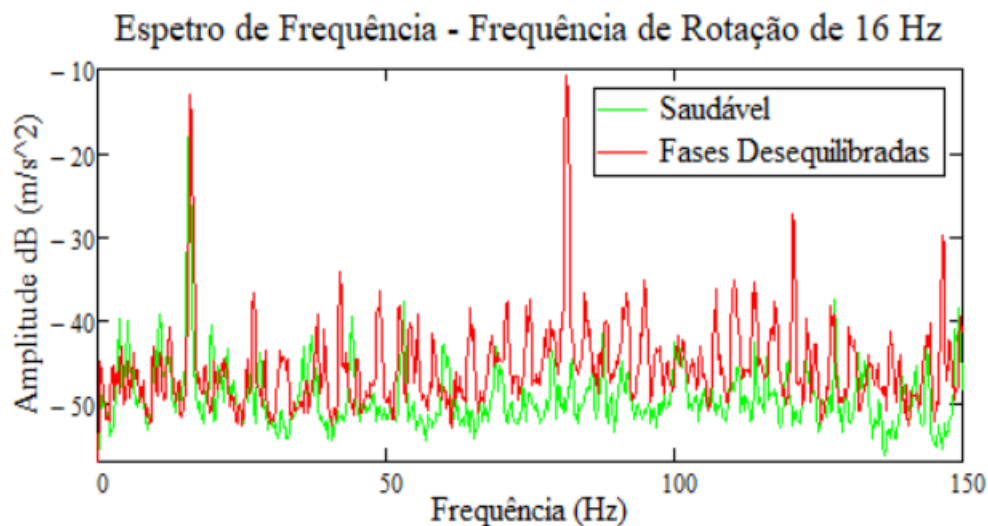
**Figura 101 Amplitude de vibração radial para o desequilíbrio de fases**

Quanto ao seu espectro, verifica-se que existe o aumento da componente a 1xRPM, o aumento do ruído de chão e o aparecimento de harmônicas e de uma frequência com amplitude superior à frequência de rotação. Contudo, esta frequência não se apresenta como sendo múltipla da frequência de rotação, nem da frequência de alimentação. No caso específico, o motor é alimentado por 32 Hz, possui a frequência de rotação de 16 Hz e a frequência em questão apresenta o valor de 82 Hz, não se tendo encontrado explicação para este valor. As setas presentes no gráfico representam as frequências típicas de dano apresentadas em 5.11.1.



**Figura 102 Espetro de frequência para o caso de fases desequilibradas**

A visualização do espectro através da escala logarítmica confirma o aumento do ruído de chão e o aparecimento de várias outras frequências.



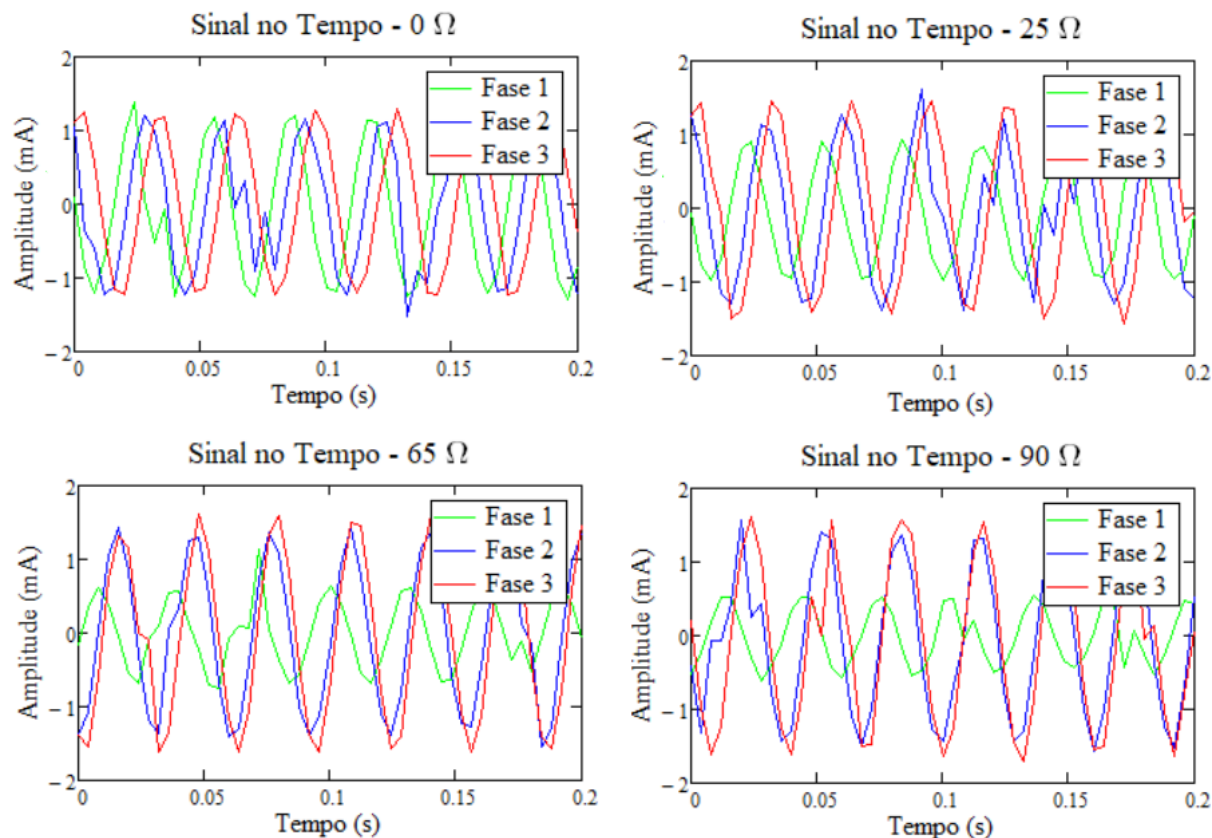
**Figura 103** Espectro de frequência em dB para o caso de fases desequilibradas

A observação dos espectros permite identificar claramente alterações aos padrões de funcionamento do motor quando este funciona com fases desequilibradas. Contudo, os resultados obtidos não estão de acordo com o enunciado em 5.11.1.

#### **6.4.3.2. Análise de corrente**

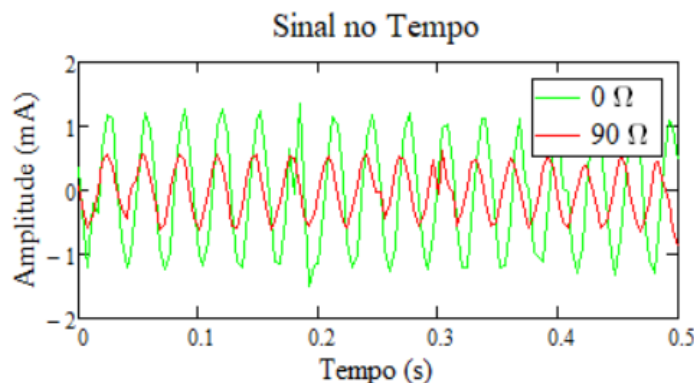
Para a realização da análise de corrente foi colocado um transformador de corrente em cada uma das fases, que permite extrair o sinal de corrente nessa mesma fase, possibilitando a visualização das três fases bem como a relação de fase entre estas. O motor foi alimentado pelo variador de frequência com 32 Hz e o reóstato foi colocado na Fase 1 de modo a que resistência apresentada no início fosse 0  $\Omega$ , sendo esta gradualmente alterada para 25  $\Omega$ , 60  $\Omega$  e 90  $\Omega$ .

Quanto à corrente de alimentação do motor obtiveram-se os resultados presentes na Figura 104.



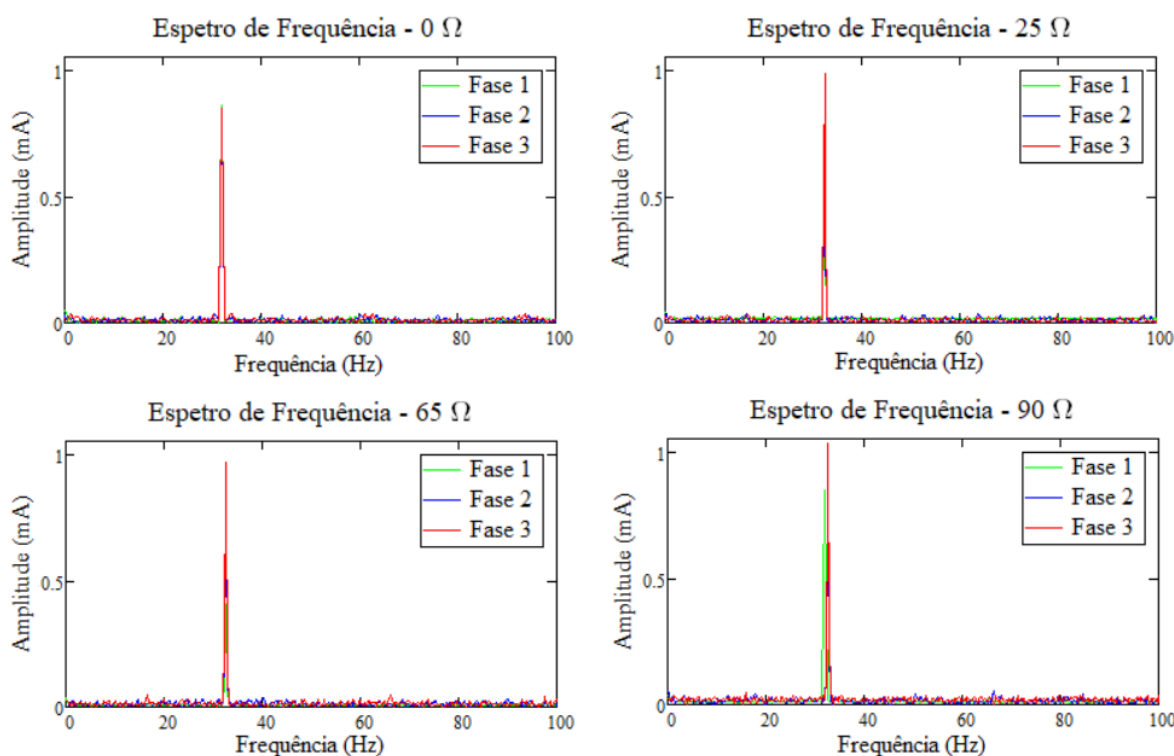
**Figura 104 Análise de corrente - Sinal no tempo para as 3 fases do motor consoante o valor de resistência aplicada a uma das fases**

À medida que a resistência aplicada à Fase 1 aumenta, verifica-se a diminuição da sua amplitude, o que seria de esperar pela lei de Ohm e como se pode comprovar na Figura 105, que apresenta a Fase 1 nas situações sem desequilíbrio e com o desequilíbrio máximo que foi possível simular. O contrário acontece às restantes duas fases, em que se verifica o aumento da sua amplitude. Também no desfasamento entre fases se verificam alterações. Inicialmente existe um desfasamento de aproximadamente 120°, tendendo as fases saudáveis a ficar em fase com o aumentar do desequilíbrio.



**Figura 105** Análise de corrente - Sinal no tempo para uma fase desequilibrada

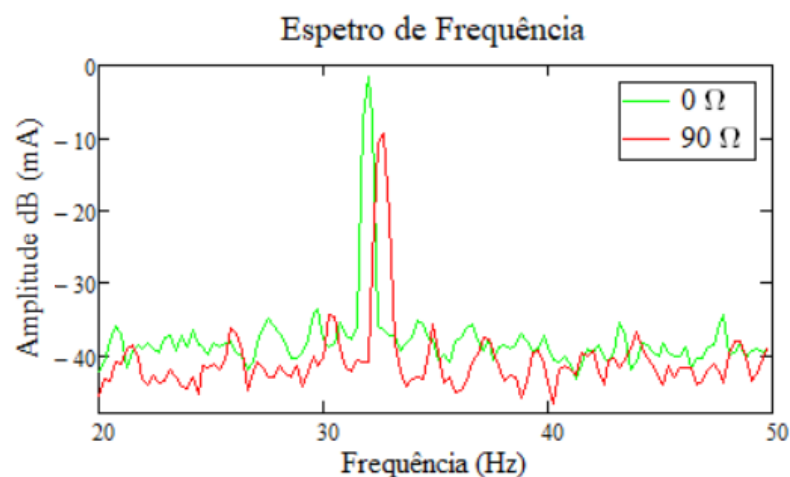
Quanto aos espectros em frequência não é possível retirar muita informação. Verifica-se que a única frequência com amplitude significativa é a frequência de alimentação, coincidente para as três fases, que a sua amplitude tem tendência a aumentar e que existe um pequeno desvio na frequência que alimenta as Fases 2 e 3 em relação a Fase 1 à medida que o desequilíbrio aumenta.



**Figura 106** Análise de corrente – Espectro de frequência para as 3 fases do motor consoante o valor de resistência aplicada a uma das fases

Minudenciando o espectro de frequência da Fase 1, alterando a escala para logarítmica e assumindo apenas o desequilíbrio máximo capaz de ter sido simulado (90

$\Omega$ ), confirma-se que existe um desvio na frequência de alimentação com a existência de desequilíbrio. A Figura 107 mostra que a amplitude da frequência de alimentação, à semelhança das restantes frequências, diminui com o desequilíbrio. Contudo, este caso é perfeitamente normal uma vez que a aplicação de uma resistência mantendo a tensão constante provoca uma diminuição de corrente (Lei de Ohm). Ao contrário de outros possíveis danos, com a existência de desequilíbrio de fases, a amplitude da frequência de alimentação tende a diminuir e não a aumentar, isto apenas se a tensão de alimentação se mantiver constante. Desta forma seria benéfica a análise simultânea da tensão e da corrente de alimentação do motor, as duas em conjunto seriam capazes de diagnosticar o presente dano com maior precisão.



**Figura 107 Análise de corrente - Espetro de frequência para uma fase desequilibrada**

A Tabela 9 confirma o desvio da frequência de alimentação com o aumento da resistência introduzida pelo reóstato. À medida que a resistência foi aumentando e, consequentemente, a fase foi sendo desequilibrada verificou-se através do *display* do variador de frequência que a frequência de alimentação foi aumentando, sem que este valor fosse alterado propositadamente. Este fenómeno poderá ser justificado pela necessidade das fases saudáveis compensarem o desequilíbrio da fase remanescente.

**Tabela 9 Relação entre resistência em uma das fases e a frequência de alimentação solicitada pelo motor**

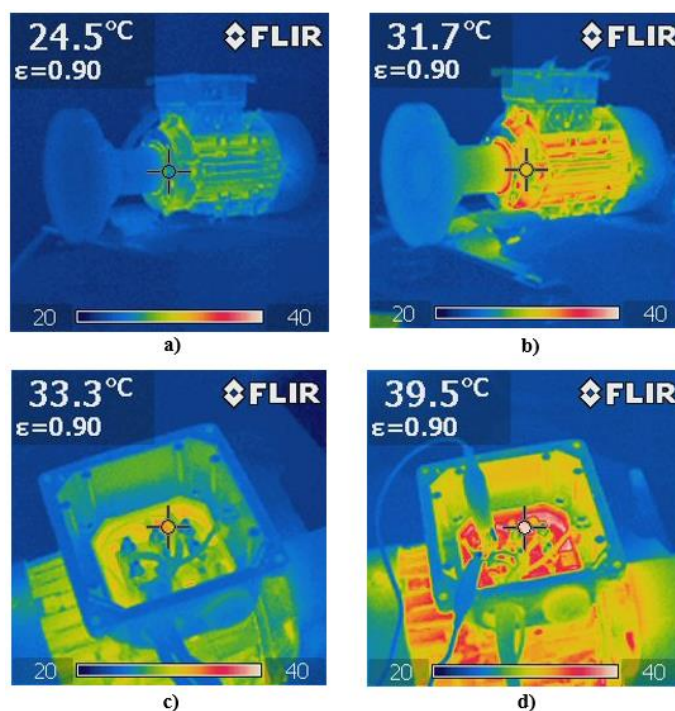
Resistência	Frequência de alimentação
0 $\Omega$	32 Hz

10 $\Omega$	32,4 Hz
25 $\Omega$	32,5 Hz
65 $\Omega$	32,6 Hz
90 $\Omega$	32,6 Hz

Assim se conclui que a utilização periódica de um frequencímetro, ou a criação de um alarme, poderá ajudar na detecção de danos elétricos deste tipo.

#### **6.4.3.3. Termografia**

A análise termográfica foi efetuada tendo-se realizado medições em duas situações distintas, a de motor com todas as fases equilibradas e com fases desequilibradas. Em ambos os casos o motor operou sob as mesmas condições e durante o mesmo período de tempo, tendo-se deixado o motor arrefecer consideravelmente entre a realização da primeira medição e da segunda, para que não existisse influência do funcionamento do motor no primeiro caso no segundo. Os resultados obtidos estão expressos na Figura 108.



**Figura 108 Análise Termográfica: a) Motor saudável b) Motor com fases desequilibradas c) Caixa de ligações motor saudável d) Caixa de ligações motor com fases desequilibradas**

Conclui-se que o desequilíbrio de fases se reflete em um aumento de temperatura do motor e que é possível verificar alterações aos parâmetros térmicos do mesmo aquando a presença deste dano.

#### **6.4.4. Omissão de fase**

A perda de fase é um caso específico do desequilíbrio de fases em que a resistência é tal que origina uma perda de 100% na amplitude de corrente de uma das fases.

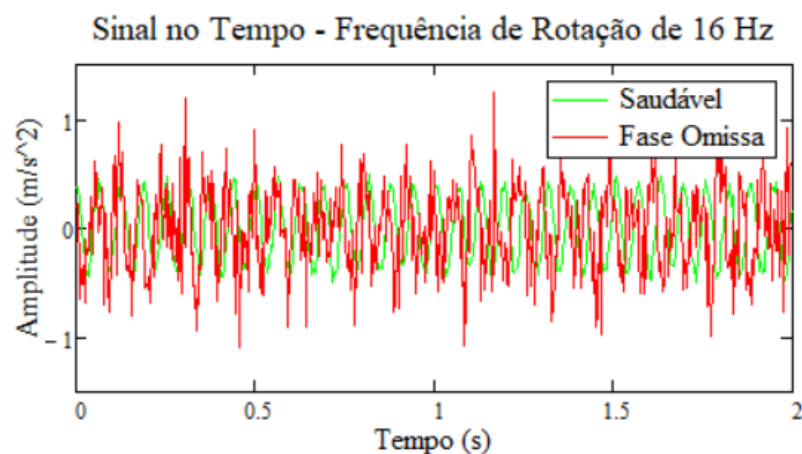
Este dano foi simulado desligando-se uma das fases do motor. Esta foi desligada em duas situações distintas: com o motor desligado, para simular a perda de fase antes da operação do motor, e com este em funcionamento, para simular a perda de fase durante a operação do motor. Quando o motor é ligado com uma das fases omissa este apresenta alteração ao seu ruído, intensificado pelo aumento da frequência de alimentação, apresenta sinais de início de operação, mas não chega a iniciar a menos que a inércia do rotor seja vencida. Caso a fase seja perdida já com o motor em funcionamento este permanece em funcionamento e continua a ser possível variar a sua rotação. Contudo, apresenta alterações ao seu ruído, semelhante ao que acontece quando se aumenta a carga.



Experimentou-se também simular a perda de duas das fases, verificando-se que quando estas estão omissas o motor não apresenta nenhuma manifestação e caso sejam perdidas durante o funcionamento o motor deixa de funcionar instantaneamente.

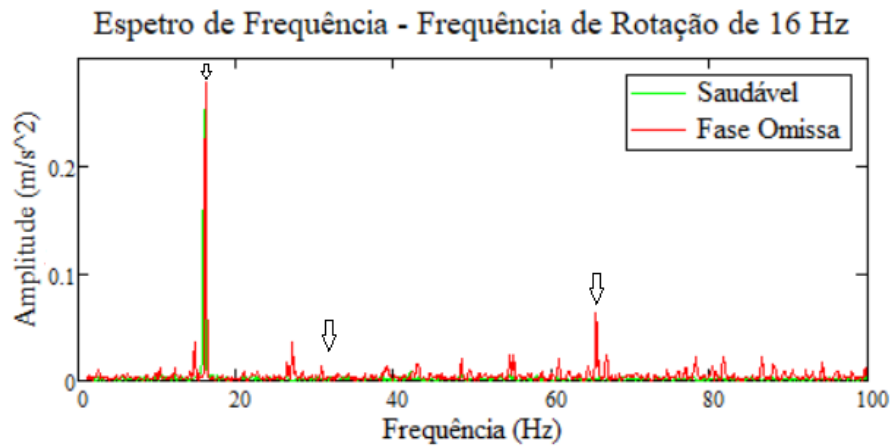
#### 6.4.4.1. Análise de vibrações

A análise de vibração foi realizada em dois motores distintos, de igual marca e características (Figura 65). Os resultados obtidos em ambos os motores foram semelhantes. Traduzindo-se a perda de fase num aumento dos níveis de vibração radial, como mostrado na Figura 109.



**Figura 109** Amplitude de vibração radial para o caso de perda de fase

E nos espectros presentes na Figura 110, que mostram um espectro muito limpo e claro, quando o motor possui todas as fases em que a frequência de rotação é a única que se destaca, ficando este espectro abafado pela sobreposição do espectro do motor com fase omissa que revela o aumento da componente a  $1 \times \text{RPM}$  e o aparecimento da componente a  $2f_e$ . Verifica-se ainda o aumento do ruído de chão em que alguns dos seus maiores picos correspondem a harmônicas da frequência de rotação. As setas presentes no gráfico indicam a posição das frequências típicas de dano enunciadas em 5.9.1.



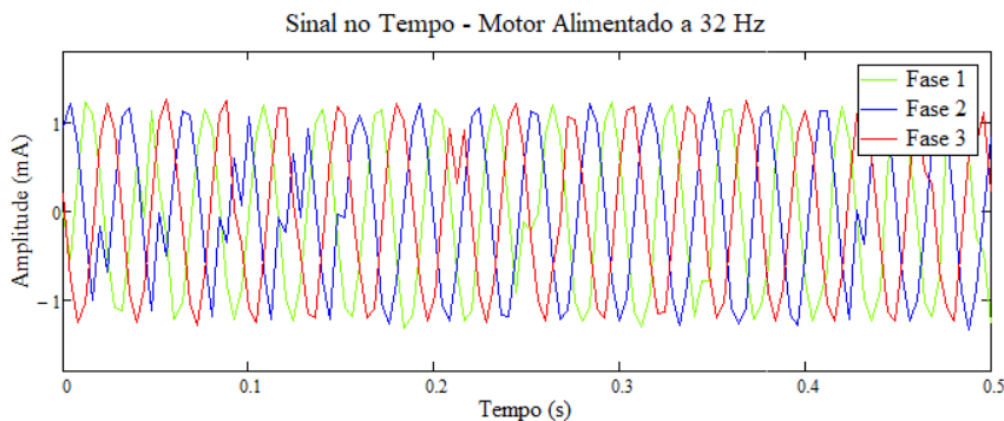
**Figura 110** Espectro de frequência para o caso de perda de fase

Como é de notar, não se consegue identificar as componentes a  $2xRPM$  e  $f_e$ , não existindo nenhum pico considerável para estas frequências, que são coincidentes numericamente (32 Hz). Contudo, caso existisse um pico nesta zona, devido as características do motor e pelo fato de o motor estar a operar sem carga, o que lhe confere um valor de escorregamento muito baixo, seria difícil distinguir estas frequências.

Conclui-se que se verificam alterações tanto no sinal no tempo como no espectro de frequência. No entanto, estas não validam totalmente o enunciado em 5.9.1.

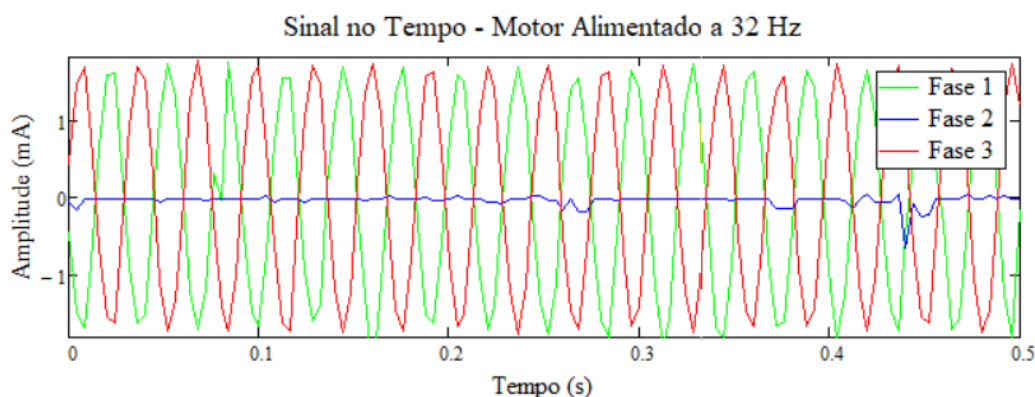
#### **6.4.4.2. Análise de corrente**

Para a situação em que o motor possui as 3 fases presentes obteve-se o sinal no tempo da Figura 111, onde é possível verificar que estas estão equilibradas, possuindo a mesma amplitude e apresentando um desfasamento de  $120^\circ$  entre si.



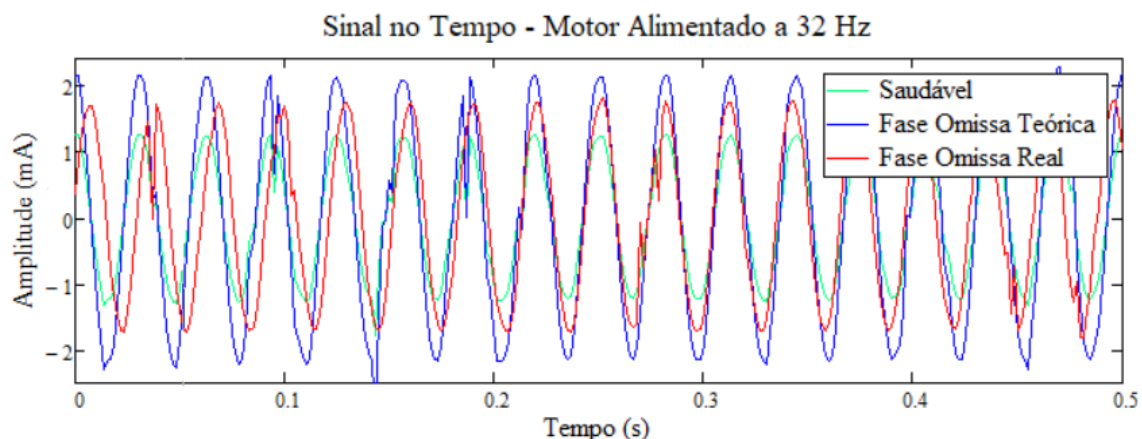
**Figura 111 Corrente do motor com as 3 fases presentes**

Quando uma das fases é perdida, a Fase 2 neste caso, a amplitude das restantes fases aumenta ligeiramente e o desfasamento entre estas aumenta para  $180^\circ$ , como referido em 5.9.2., ao passo que deixam de ser adquiridos dados referentes à Fase 2, como seria de esperar e como se apresenta na Figura 112.



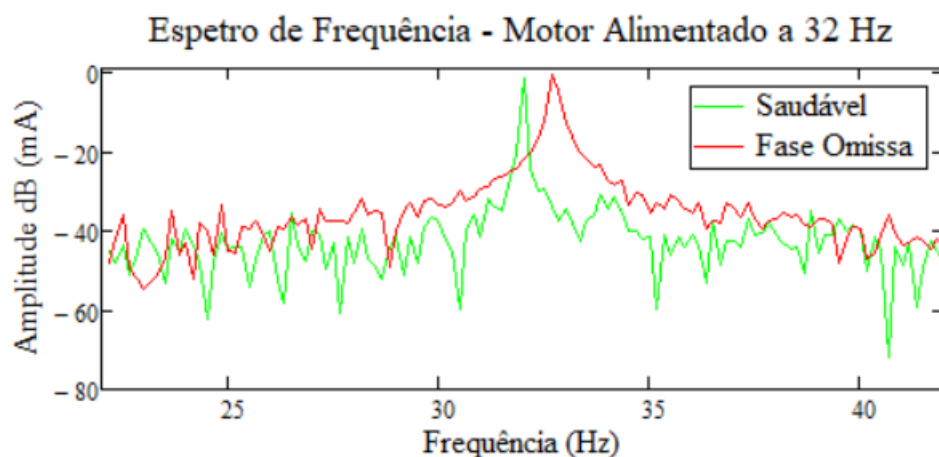
**Figura 112 Corrente do motor com Fase 2 omissa**

Analisando-se exclusivamente uma fase das que ficam ativas, verifica-se que a amplitude de corrente aumenta, como já referido, não pelo valor de  $\sqrt{3} = 1,732$  citado em 5.9.2, mas por aproximadamente 1,036. A Figura 113 permite visualizar a comparação entre a corrente de uma das fases, na situação em que o motor possui as 3 fases, e duas situações distintas: a corrente teórica que a fase deveria apresentar e a corrente real observada experimentalmente.



**Figura 113** Comparação de corrente de uma das fases do motor saudável com o valor teórico e valor real de corrente em situação de fase omissa

Quanto ao espectro de frequência verifica-se que, quando o motor é alimentado por um valor de corrente com determinada frequência, 32 Hz neste caso, esta tende a aumentar quando o motor perde uma das fases. A Figura 114 permite observar que quando o motor é alimentado por uma frequência de 32 Hz esta aumenta para 32,7 Hz, após perder uma das fases e que, de um modo geral, a amplitude de todas as frequências presentes também aumenta.

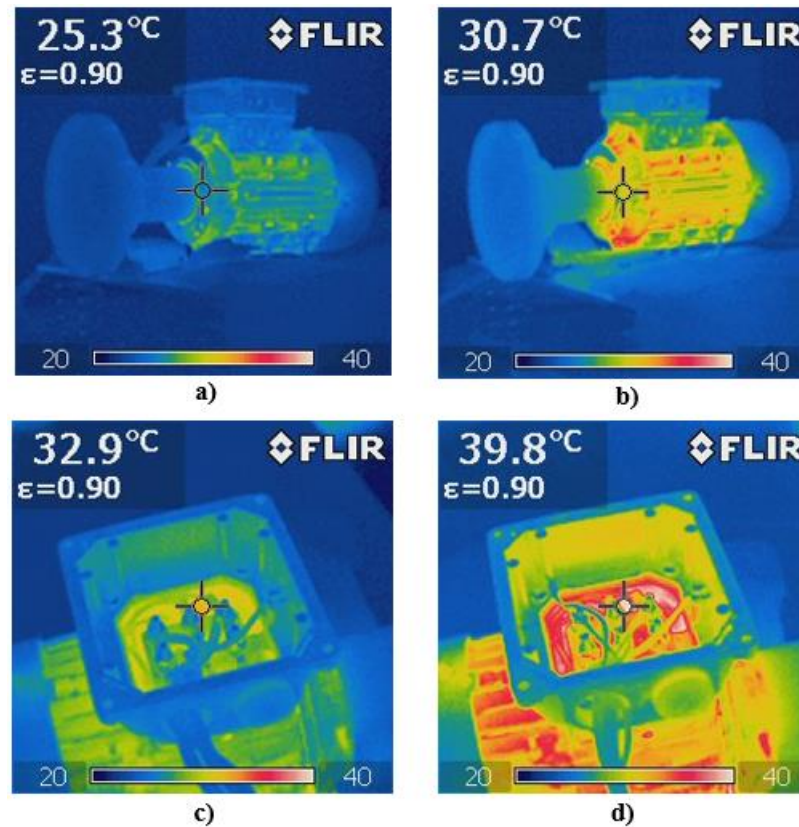


**Figura 114** Espectro de frequência - Comparação entre motor saudável e motor com fase omissa

#### 6.4.4.3. Termografia

A análise termográfica foi realizada tendo-se realizado uma medição com todas as fases presentes e uma medição após se desligar uma das fases. Em ambos os casos o motor operou sob a mesmas condições de carga e durante o mesmo período de tempo,

tendo-se deixado o motor arrefecer consideravelmente entre a realização da primeira medição e da segunda, para que não existisse influência do funcionamento do motor no primeiro caso no segundo. Os resultados obtidos estão expressos na Figura 115.



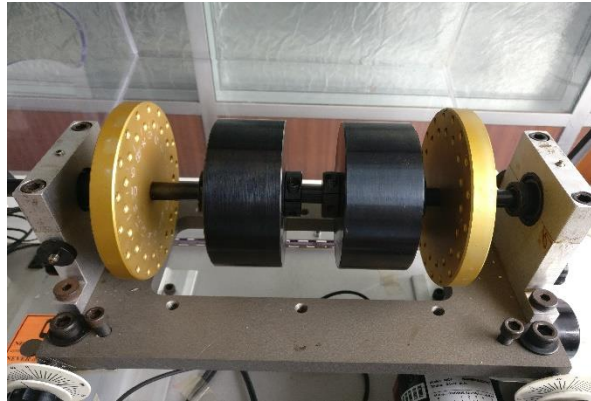
**Figura 115 Análise Termográfica: a) Motor Saudável b) Motor com fase omissa c) Caixa de ligações motor saudável d) Caixa de ligações motor com fase omissa**

Pode-se assim concluir que a falta de uma das fases se reflete em um aumento de temperatura do motor, verificando-se alterações aos parâmetros térmicos do mesmo aquando a presença deste dano.

#### 6.4.5. Barras partidas

Este dano foi estudado com recurso a bancada didática da *Spectraquest*, presente na Figura 64, na qual foram utilizados dois motores: um saudável e outro com 12 barras partidas.

Os motores acoplam um veio, sobre o qual se aumentou a carga de modo a aumentar o escorregamento do motor e, conseqüentemente, permitir melhorar a identificação das frequências de dano esperadas.

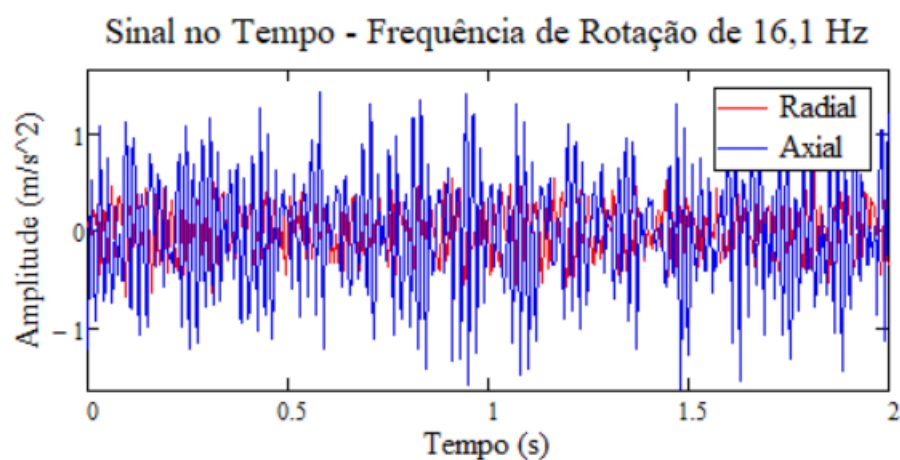


**Figura 116 Carga colocada no motor em estudo**

Numa primeira análise verificou-se que o ruído do motor com barras partidas é superior comparativamente ao motor saudável e que quando este funcionava por longos períodos de tempo apresentava determinados “bateres” espontâneos.

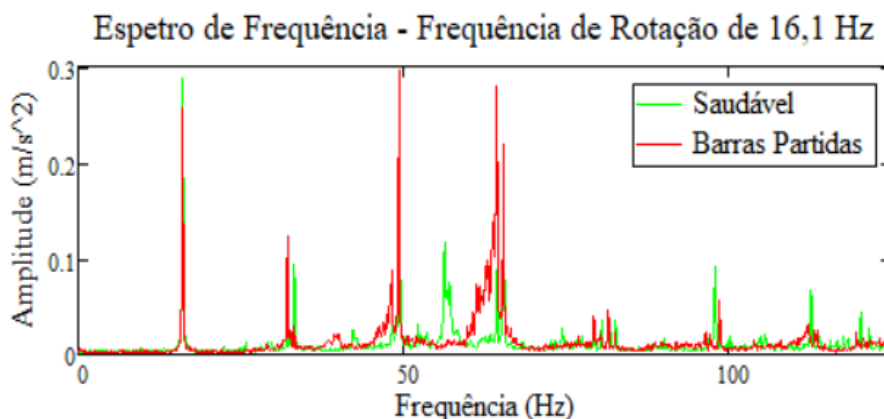
#### **6.4.5.1. Análise de vibrações**

A análise de vibrações não se apresentou satisfatória nos motores utilizados. Para o motor com barras partidas, verificou-se que a vibração axial é maior do que a radial. Como comprovado na Figura 117, confirmando o enunciado em 5.8.1.



**Figura 117 Comparação da amplitude de vibração radial e axial no motor com barras partidas**

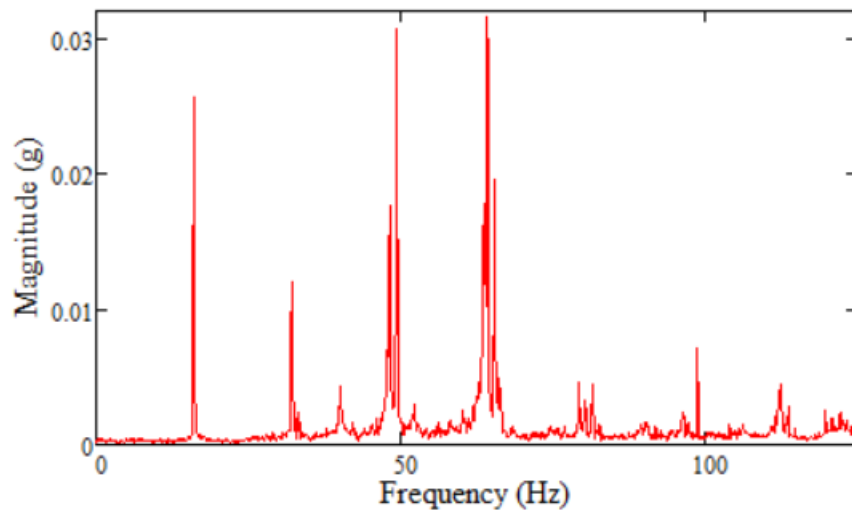
Contudo, verificou-se que os espectros do motor saudável e motor com barras partidas são bastante semelhantes. Seria de esperar que o espectro do motor saudável fosse um espectro claro em que apenas a frequência de rotação se destacasse, à semelhança dos espectros obtidos em análises anteriores. Contudo, isto não se verificou, como mostrado na Figura 118 em que o espectro do motor saudável chega mesmo a apresentar frequências de maior amplitude e maior ruído de chão.



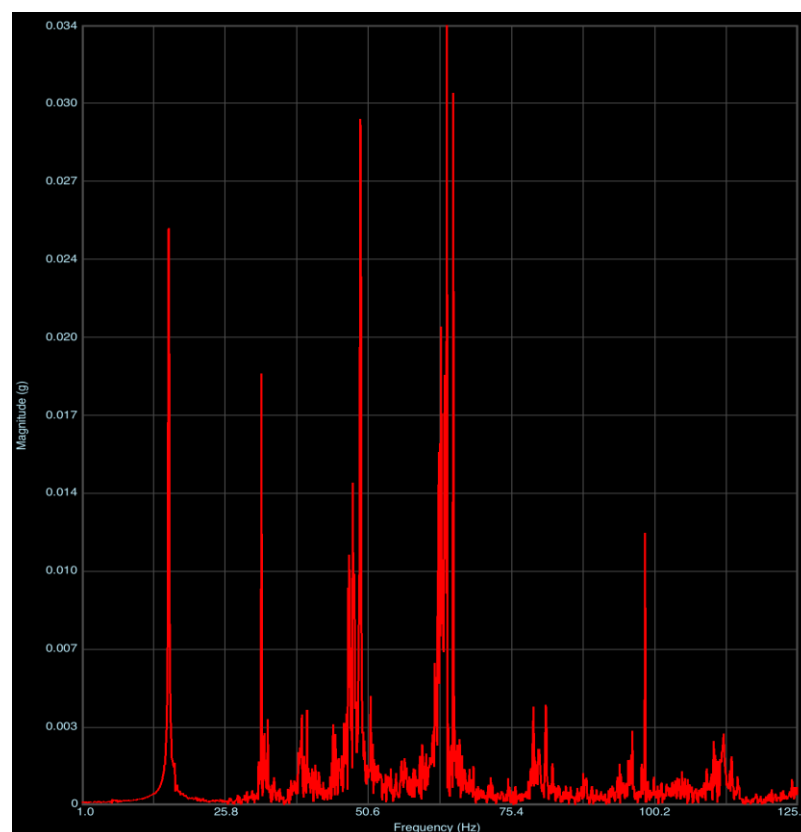
**Figura 118** Espectro de frequência - Comparação entre motor saudável e motor com barras partidas

No espectro apenas se consegue identificar a frequência de rotação sendo todos os restantes picos harmónicas e interarmónicas da mesma, não se conseguindo identificar as bandas de frequência enunciadas pela Eq. 39 ou qualquer sintoma enunciado em 5.8.1.

Foram realizadas múltiplas medições, experimentando-se diferentes pontos de medição e diferentes velocidades de rotação, contudo nunca se conseguiu obter um resultado aproximado do enunciado em 5.8.1 ou sugestivo do dano presente. Isto levou a que se suspeitasse que o problema pudesse ser o facto de estarem a ser utilizados acelerómetros *low-cost* em vez de acelerómetros profissionais e mais capazes como os piezoelétricos. De modo a despistar esta hipótese foram realizadas duas medições nas mesmas condições de funcionamento e em simultâneo, utilizando-se os acelerómetros *low-cost* da *Phidgets* e um acelerómetro piezoelétrico associado a um outro analisador de vibrações, obtendo-se os resultados presentes na Figura 119 e Figura 120 que comprovam que o acelerómetro *low-cost* e o analisador desenvolvido em LabVIEW é capaz de apresentar resultados tão satisfatórios como um acelerómetro piezoelétrico dispendioso.



**Figura 119** Espectro de frequência obtido pela utilização do acelerômetro *Phidjets*



**Figura 120** Espectro de frequência obtido pela utilização de acelerômetro piezoelétrico

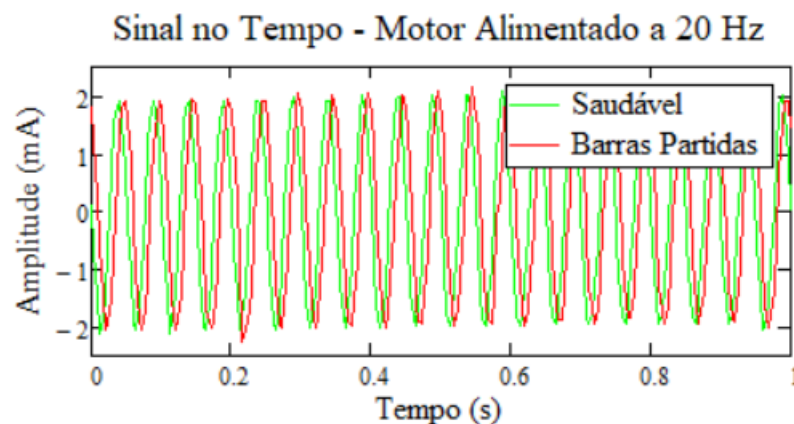
Concluindo-se que os resultados obtidos nas várias medições realizadas não foram influenciados pelo tipo de acelerômetro utilizado, tendo sido influenciados por outros fatores externos desconhecidos.



#### 6.4.5.2. Análise de corrente

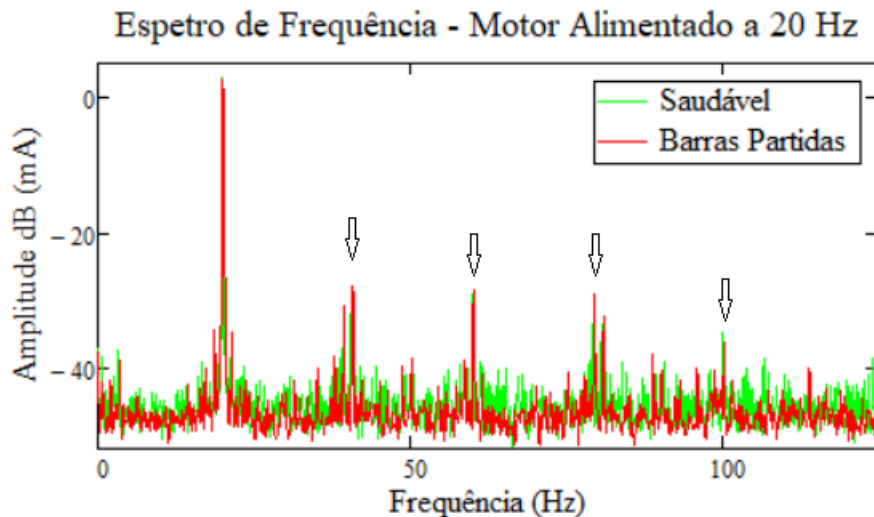
Devido ao facto de as três fases do motor serem equilibradas realizaram-se medições apenas numa única fase, pois o dano em questão altera as três fases de igual modo, tendo o motor da Figura 64 sido alimentado com 20 Hz.

Relativamente ao sinal no tempo, ou seja, à corrente solicitada pelo motor à fonte, verifica-se que as amplitudes de corrente são semelhantes no motor saudável e no motor com barras partidas. Situação ilustrada na Figura 121 e que poderá ser justificado pelo facto de o problema residir no rotor e não no estator.



**Figura 121 Análise de corrente: Sinal no tempo para motor com barras partidas**

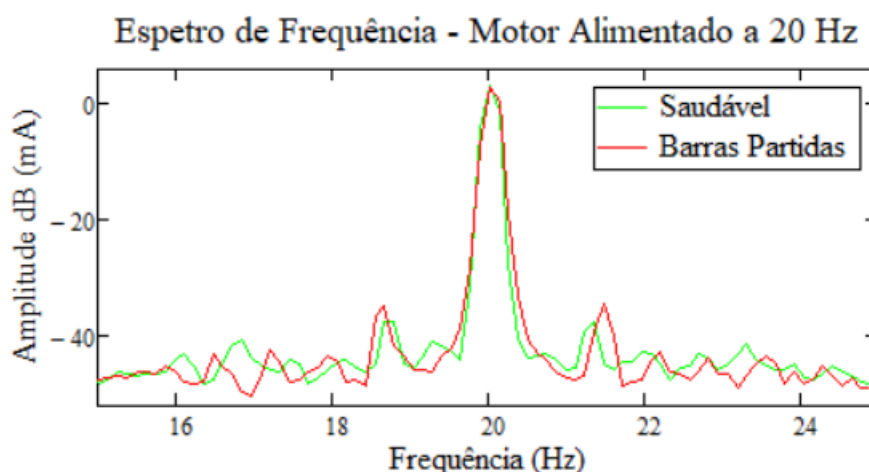
Uma vez que as frequências típicas deste dano surgem muito próximo da frequência de alimentação do estator e de modo a aumentar a probabilidade de identificação das mesmas, realizaram-se medições com uma grande resolução em frequência (aquisição de 2048 pontos), obtendo-se os espectros presentes na Figura 122.



**Figura 122 Análise de corrente: Espectro de frequência para motor com barras partidas**

Por observação, conclui-se que o espectro do motor com barras partidas não apresenta alterações significativas face ao espectro do motor saudável, exibindo este um maior ruído de chão e o mesmo número de harmônicas da frequência de alimentação (indicadas pelas setas) que o espectro do motor com barras partidas.

Efetuada-se *zoom* à frequência de alimentação verificou-se a existência de bandas laterais em torno da frequência de alimentação, correspondente à terceira banda lateral teórica esperada pela Eq. 41.



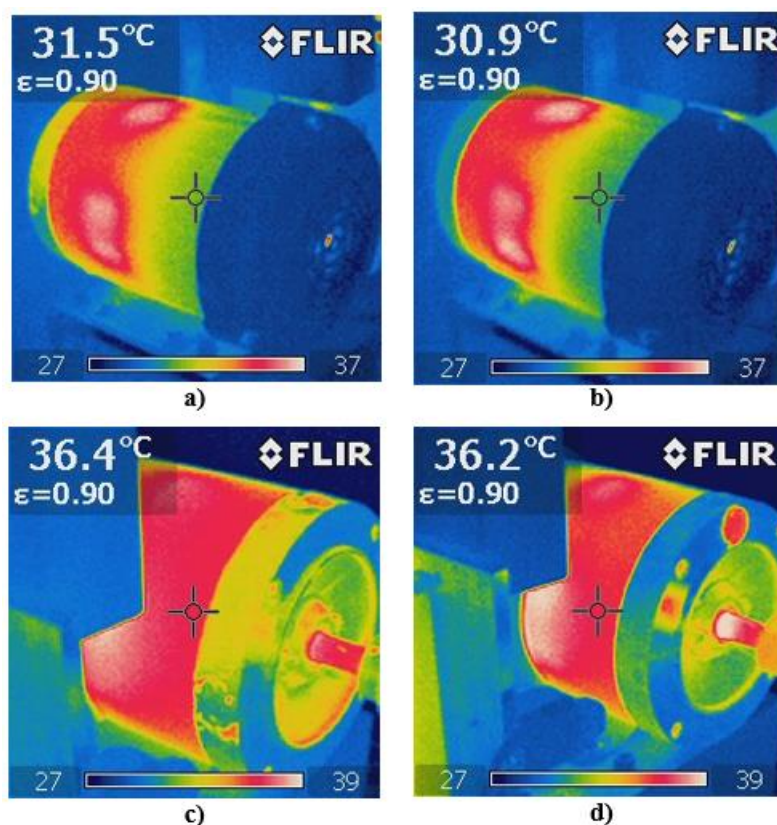
**Figura 123 Análise de corrente: Zoom ao espectro de frequência para motor com barras partidas**

Contudo, como referido no artigo [5] e em 5.9.2 as bandas laterais também se verificam no espectro do motor saudável, apesar de a amplitude ser ligeiramente superior no motor com barras partidas.

Face aos resultados expostos conclui-se que não foi possível identificar o presente dano através da análise de corrente realizada.

#### 6.4.5.3. Termografia

A análise termográfica foi realizada tendo-se recorrido a dois motores, um saudável e um com 12 barras partidas. Ambos os motores operaram sob a mesmas condições de carga e durante o mesmo período de tempo. Os resultados obtidos estão expressos na Figura 124.



**Figura 124 Análise Termográfica: a) Motor saudável b) Motor com barras partidas c) Motor saudável frente d) Motor com barras partidas frente**

Conclui-se que não se conseguiu obter uma alteração ao padrão térmico do motor danificado face ao motor saudável, existindo pontos em que o motor saudável apresenta uma maior temperatura do que o motor danificado, contrariamente ao esperado e enunciado em 5.9.3.

## 6.5. Discussão de Resultados

Dos três métodos de análise estudados, a análise de vibração foi aquele em que se sentiu maior dificuldade. Revelou-se um método muito sensível a excitações externas, como por exemplo, toques espontâneos no motor, pessoas a circularem em torno do motor, máquinas e aparelhos a funcionar na periferia e muito dependente da experiência do analista e do conhecimento que este possui relativamente ao equipamento em análise e às diversas técnicas de análise existentes. Para o sucesso das medições, existe um grande número de variáveis a ter em conta, tais como a mobilidade do motor nos diferentes eixos, a fixação do motor, a fixação dos acelerómetros, a direção de medida, a resolução em frequência utilizada e a influência externa de outros aparelhos.

Ao longo das várias medições efetuadas aos danos estudados concluiu-se que geralmente a existência de dano provoca o aumento da amplitude de vibração do motor, o que corrobora as vantagens da aplicação deste método para a deteção de dano e a aplicação de sistemas de monitoramento *online* baseado na existência de alarmes definidos pelas variadas normas existentes. No entanto, na maior parte dos casos a amplitude manifesta-se maioritariamente num único eixo, que por sua vez depende da aplicação dada ao motor, da sua fixação e dos acoplamentos utilizados, que lhe confere níveis de mobilidade diferentes nos diversos eixos. Daqui advém a necessidade de conhecer muito bem o motor a ser analisado, realizando-se análises preliminares, tanto no tempo como em frequência, que servirão como referência para as análises futuras.

Quanto ao diagnóstico não se conseguiu identificar um dano por completo com base na sintomatologia referida no capítulo 5. Os resultados obtidos são parciais ou então não estão em concordância com a sintomatologia. Contudo, é de notar que a bibliografia não expressa a metodologia e os procedimentos utilizados na realização dos seus estudos e, como foi possível verificar, a análise de vibração é um método bastante sensível e dependente de inúmeras variáveis. Tal facto leva ao pressuposto que, se as análises não são realizadas de acordo com os mesmos procedimentos e nas mesmas condições, existe a grande probabilidade de os resultados não coincidirem.

Em suma, a análise de vibrações mostrou-se bastante sensível à deteção de dano, especialmente os danos mecânicos, como o desequilíbrio e o desaperto, obtendo-se alterações claras aos padrões normais de funcionamento do motor.

A análise de corrente, comparativamente a análise de vibração, é um método mais simples de ser aplicado uma vez que, à exceção da influência eletromagnética da cablagem ou aparelhos elétricos que estejam na vizinhança dos transformadores de corrente, não existem grandes variáveis a serem controladas.

Este método mede o padrão básico de funcionamento do motor, a corrente elétrica, tendo sido o método que melhor detetou os danos elétricos, traduzindo-se estes na alteração imediata da amplitude e da frequência da corrente de alimentação. O mesmo não se verificou com tanta facilidade para os danos mecânicos, em que a corrente geralmente se manteve igual para as situações de motor saudável e motor danificado.

Analogamente à análise de vibração também a análise de corrente manifestou dificuldades na realização do diagnóstico, não se tendo conseguido identificar as frequências típicas de dano enunciadas no capítulo 5, obtendo-se espectros muito semelhantes para as condições de motor saudável e danificado chegando a existir casos em que o motor saudável apresenta um espectro com maior ruído de chão e harmónicas que o de motor danificado, como aconteceu para o desequilíbrio e para o caso de barras partidas.

Conclui-se da análise de corrente que este método também se revela sensível à deteção de dano, especialmente os elétricos. Vários foram os danos que se manifestaram pelo aumento do valor de corrente solicitada pelo motor, concluindo-se que a existência de um dano e o seu agravar não só prejudicam a máquina, como aumentam os custos económicos da sua alimentação. A análise do desequilíbrio de fases mostrou ainda que seria benéfica a análise simultânea da corrente e tensão do motor, pois a alteração dos valores de corrente e de tensão em simultâneo poderá ser uma forma de melhorar o diagnóstico por intermédio deste método.

Relativamente à análise termográfica, no controlo de condição procura-se obter alterações aos padrões térmicos do equipamento. Como já referido anteriormente, é necessário conhecer a emissividade e a refletividade do motor para que se obtenham valores corretos de temperatura dos diversos pontos do motor. No entanto, este pormenor não é relevante se se mantiverem constantes estes valores nas diversas medições periódicas, bem como o ângulo em que a camara é posicionada e todas as variáveis externas que possam influenciar a medição.

Das análises efetuadas conclui-se que, para os casos de desequilíbrio de fase e perda de fase este método se mostrou bastante eficaz na deteção de anomalia. Consegue-se identificar perfeitamente as alterações térmicas na presença destes danos. Quanto à realização de diagnóstico este método não mostra ser promissor, uma vez que é impossível distinguir os diversos danos existentes apenas pelo gradiente térmico.

Este método foi apenas aplicado a danos elétricos. Pelo conhecimento comum é sabido que as existências de anomalias elétricas são suscetíveis de provocar aumentos de temperatura. Contudo, verificou-se ao longo do trabalho de pesquisa efetuado que este também poderá ser utilizado para a deteção de danos mecânicos, como é o caso de rolamentos e chumaceiras.

Dos danos simulados o caso de barras partidas foi o menos satisfatório. As análises foram efetuadas recorrendo-se à bancada da *Spectraquest* presente na Escola Náutica Infante D. Henriques. Todavia, esta bancada estava sem utilização há vários anos, tendo sido deixada imobilizada e montada no estado em que foi encontrada. Isto poderá ter originado um conjunto de situações que comprometeram os resultados das análises obtidas. A bancada funciona por substituição do motor que acopla o veio existente. Existe um motor categorizado como saudável e um conjunto de motores em que cada um destes possui um dano próprio. Contudo, verificaram-se sinais muito semelhantes para o motor saudável comparativamente aos motores danificados. O que leva a concluir que algum fator externo, muito possivelmente proveniente do tempo de inutilização, comprometeram as análises efetuadas.

No geral, os dados obtidos não se aproximam muito do que foi verificado na literatura. Contudo, este facto não invalida a viabilidade da aplicação destes métodos no controlo de condição de motores elétricos. É de ter em atenção que as experiências foram realizadas sob determinadas condições que poderão não se aproximar das condições das experiências realizadas nos mais variados documentos, que as experiências realizadas não foram efetuadas em um ambiente controlado, como por exemplo um laboratório com mesas com apoios anti vibração, que foram utilizados equipamentos *low-cost* que não possuem a mesma sensibilidade que os equipamentos profissionais e que os analisadores utilizados foram programados com base no conhecimento obtido pelo estudo desenvolvido em torno dos referidos métodos, não se conhecendo os algoritmos presentes na programação dos equipamentos profissionais.

## **7. Conclusão**

### **7.1. Conclusões gerais**

A presente dissertação incide essencialmente no diagnóstico de danos em motores elétricos de indução trifásicos e como é que este é concretizado através da análise de vibrações, análise de corrente e análise termográfica. Após a recolha bibliográfica dos danos típicos em motores elétricos de indução e dos seus sintomas para os três métodos de análise selecionados procedeu-se à sua demonstração experimental com os objetivos de validar a sintomatologia recolhida e a aferir a viabilidade da aplicação destes métodos no controlo de condição de motores elétricos.

Uma vez que a aplicação destes métodos exige a utilização de equipamentos de análise dispendiosos e de forma a contornar esta limitação foram desenvolvidos dois analisadores, um de vibração e outro de corrente, em LabVIEW com recurso a sensores de custo reduzido e de fácil acesso no mercado. Esta fase do trabalho exigiu a capacidade de solucionar vários problemas, quer a nível de programação bem como de aplicação dos conceitos teóricos estudados. No final, obtiveram-se resultados muito semelhantes aos já obtidos por outros autores que recorreram a analisadores e sensores profissionais.

Outra limitação à realização das atividades experimentais foi o acesso a motores elétricos com danos conhecidos implementados ou acesso a um laboratório de controlo de condição que possibilitasse a realização das diversas medições pretendidas. Para solucionar este problema, e permitir que gerações futuras o possam fazer na Escola Naval idealizou-se, uma bancada didática com a capacidade de simular vários dos danos típicos em motores elétricos de indução que à data de entrega da presente dissertação não se encontrava completamente produzida devido à falta de material adquirido *online* não entregue atempadamente.

Durante as atividades experimentais verificou-se que nenhum dos três métodos pode ser generalizado e que o mesmo dano se manifesta de forma mais clara para um método específico do que para outro, sendo por isso o conhecimento e a experiência do analista fatores bastante importantes no diagnóstico. Contudo, é possível concluir que cada método pode ser aplicado de maneira útil num contexto adequado, dependendo das condições de operação, dos possíveis sinais de falha e da sua sensibilidade. Também se

verificou que os danos podem estar interligados, isto é, a existência de um dano facilmente origina outro dano distinto, manifestando-se ambos em simultâneo dificultando o diagnóstico e a descoberta da causa raiz do problema.

Nem sempre se obteve concordância entre a informação obtida experimentalmente e a sintomatologia recolhida da bibliografia, tal facto poderá ser justificado essencialmente pelas condições não controladas em que as medições foram efetuadas e pelo desconhecimento das condições em que foram realizadas as atividades referidas ao longo da bibliografia. No entanto, conseguiram-se detetar alterações aos padrões de funcionamento dos motores, sendo o diagnóstico a grande dificuldade sentida ao longo da atividade experimental, acrescida da ausência de sintomatologia de determinados danos para os três métodos em simultâneo. A identificação das componentes específicas associadas a cada dano nem sempre foi clara. Um motor danificado apresenta um espectro muito variado, chegando a apresentar várias componentes espectralis. Contudo, nem todas essas componentes se associam ao presente dano. A dificuldade está em conseguir identificar cada componente específica e desprezar as restantes. De modo a minimizar esta dificuldade, nos analisadores desenvolvidos, foi programada a opção de apresentação de linhas verticais nas posições exatas das frequências características do dano em questão.

Finalmente, é possível concluir que os métodos estudados são relativamente fáceis de aplicar, pelo menos numa fase de deteção, e fornecem informação válida sobre o estado dos equipamentos. Com isto, através da realização de análises periódicas e comparação da informação obtida com padrões de referência é perfeitamente viável a aplicação do controlo de condição em motores elétricos de indução a bordo dos navios da Marinha Portuguesa, possibilitando a deteção de alterações aos padrões de funcionamento dos equipamentos, aumentando o tempo disponível para o planeamento de ações de manutenção e diminuindo a manutenção corretiva a bordo, tornando-se o diagnóstico mais complicado devido a inúmeras variáveis difíceis de controlar.

O trabalho desenvolvido foi bastante ambicioso e tentou-se contemplar o maior número de danos possíveis para três métodos de análise distintos. Deixa-se como conselho que em trabalhos futuros se procure focar em apenas um método de análise e num número reduzido de danos, possibilitando que o trabalho não seja efetuado de forma



tão superficial e que se consiga aprofundar o estudo o melhor possível, refletindo-se isto numa vantagem para a comunidade científica.

## **7.2. Lições aprendidas**

A elaboração da presente dissertação permitiu aplicar conhecimentos de várias unidades curriculares do ciclo de estudos de Engenharia Naval – Ramo de Mecânica, o que permitiu cimentar e relembrar conteúdos aprendidos durante os cinco anos de curso. O trabalho desenvolvido obrigou o desenvolvimento da capacidade de contornar problemas inopinados e o ganho de experiência na análise de espetros. Do mesmo modo, permitiu adquirir conhecimentos sobre sistemas de aquisição e processamento de sinal, e ainda desenvolver os conhecimentos na área da manutenção, nomeadamente dos métodos de controlo de condição aplicados, da capacidade de programação e da interação com softwares informáticos, nomeadamente LabVIEW, MathCAD, SolidWorks e WorkingModel.

## **7.3. Trabalhos futuros**

Ao longo de todo o trabalho desenvolvido existiram vários momentos em que surgiram questões e problemas que levantaram outras hipóteses de trabalho em que se considera benéfico o seu estudo.

Ficando como proposta para trabalhos futuros os seguintes pontos:

1. Expandir o trabalho desenvolvido a outros métodos de controlo de condição existentes, procurando-se validar padrões e, caso estes não estejam documentados, criar um historial dos mesmos;
2. Realização de análise acústica, uma vez se ter verificado que a implementação de dano, principalmente elétricos, provoca alterações ao ruído produzido pelo motor;
3. Estabelecimento de padrões e criação de bases de dados para os equipamentos vitais presentes nas unidades navais da Marinha Portuguesa, visando o desenvolvimento do controlo de condição na mesma;

4. Desenvolvimento de um analisador com os danos validados e programados de modo a facilitar o diagnóstico dos mesmos;
5. Desenvolvimento de um plano de manutenção assente no controlo de condição suscetível de ser aplicado aos navios da Marinha Portuguesa;
6. Estudo da viabilidade da instalação permanente de transformadores de corrente nos quadros de alimentação dos motores elétricos a bordo e desenvolvimento de um software de análise de corrente capaz de ser conectado a estes possibilitando a análise expedita de corrente de alimentação dos motores elétricos a bordo.

## **Bibliografia**

- [1] R. C. Eisenmann Sr e R. C. Eisenmann Jr, Machinery Malfunction Diagnosis and Correction - Vibration Analysis and Troubleshooting for the Process Industries, Pearson Education, Inc, 2005.
- [2] D. Basak, A. Tiwari e S. P. Das, "Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - A review," Kanpur, India, 2006.
- [3] O. V. Thorsen e M. Dalva, "Methods of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Induction Motors," vol. 8, nº 5, September 1998.
- [4] S. Nandi, H. Toliyat e X. Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors - A Review," IEEE Transactions on energy conversion, vol. XX, nº 4, Dezembro 2005.
- [5] L. Liu e S. Ganeriwala, "Diagnostics of Induction Motor with Broken Bars Using Motor Current Signature Analysis (MCSA)," Janeiro 2006.
- [6] M. Blodt, P. Granjon, B. Raison e G. Rostaing, "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 7 April 2008.
- [7] A. Mertens e E. P. Ribeiro, "Uma abordagem sobre detecção de barras quebradas em motores de indução," em XIII Reunião Iberoamericana de CIGRÉ, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.

- [8] F. Duan, “Diagnostics of Rotor and Stator Problems in Industrial Induction Motors,” Thesis for the degree of Masters of Engineering Science, School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Adelaide, Australia, 2010.
- [9] Y. Gritli, A. O. Di Tommaso, F. Filippetti, R. Miceli, C. Rossi e A. Chatti, “Investigation of Motor Current Signature and Vibration Analysis for Diagnosing Rotor Broken Bars in Double Cage Induction Motors,” 2012.
- [10] P. S. Bhowmik, S. Pradhan e M. Prakash, “Fault Diagnostic and Monitoring Methods of Induction Motor: A Review,” International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering, vol. I, nº 1, Maio 2013.
- [11] B. M. Amaral, “Diagnóstico de Avarias em Motores Elétricos,” Dissertação de mestrado em Engenharia, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014.
- [12] B. S e V. Thomas, “Diagnoses of Internal Faults of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor - A Review,” em International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies, Manipal, 2014.
- [13] A. Silveira, “Análise por Ultra-sons no Controlo de Condição,” Dissertação de mestrado em Engenharia, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2015.
- [14] A. Glowacz e Z. Glowacz, “Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging,” Infrared Physics & Technology, vol. 81, Março 2017.
- [15] Instituto português da qualidade, Norma portuguesa NP-EN 13306 2007 - Terminologia da manutenção, 2007.

- [16] R. B. Randall, Vibration-based Condition Monitoring, Wiley, 2011.
- [17] M. J. Neale, The Tribology Handbook, 2º ed., Butterworth Heinemann.
- [18] R. C. Sampaio, “O papel do controlo de vibrações mecânicas no uso do mar,” Anais do Clube Militar Naval, 2017.
- [19] P. Tavner, L. Ran, J. Penman e H. Sedding, Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, London, United Kingdom: The institution of Engineering and Technology, 2008.
- [20] National Instruments, Labview Data Acquisition Basics Manual, 1996.
- [21] K. Shin e J. k. Hammond, Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers, Wiley, 2008.
- [22] A. Bilošová e J. Biloš, “Vibration Diagnostics,” Ostrava, República Checa, 2012.
- [23] A. Davies, Handbook of Condition Monitoring - Techniques and Methodology, Springer Netherlands, 1998.
- [24] S. Haykin e B. V. Veen, Sinais e Sistemas, Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2001.
- [25] Instituto português da qualidade, Norma portuguesa NP-EN 45020 - Normalização e atividades correlacionadas. Vocabulário geral, 2009.
- [26] ISO 10816 - Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 1: General guidelines, 1995.

- [27] DNV-GL, Rules for classification, Part 6: Additional class notations - Chapter 6: Living and working conditions, 2015.
- [28] S. Karmakar, S. Chattopadhyay, M. Mitra e S. Sengupta, Induction Motor Fault Diagnosis - Approach through Current Signature Analysis, Springer, 2016.
- [29] SpectraQuest Inc, Applied Vibration Analysis Volume I, Richmond, Virginia.
- [30] Y. Gritli, A. Bellini, C. Rossi, D. Casadei, F. Filippetti e G. Capolino, “Condition Monitoring of Mechanical Faults in Induction Machines from Electrical Signatures: Review of Different Techniques,” 2017.
- [31] Bruel and Kjaer, “Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives,” Copenhagen, Dinamarca.
- [32] W. R. Finley, “Troubleshooting Induction Motors,” Siemens Energy and Automation, Inc..
- [33] N. Mehala, “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor Using Motor Current Signature Analysis,” Tese de Doutorado, National Institute of Technology, Kurukshetra, India, 2010.
- [34] C. M. Silva, “Laboratório para deteção e diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos,” Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, Portugal, 2017.
- [35] C. F. Ferraz, “Controlo de Condição a Bordo dos Navios de Guerra,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Naval Ramo de mecânica, Escola Naval, Alfeite, Portugal, 2017.

- [36] M. Ahmad, “Termografia como instrumento de manutenção condicionada na Marinha,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Naval Ramo de mecânica, Escola Naval, Alfeite, Portugal, 2013.
- [37] Testo, Guia de Bolso Testo para Termografia - Teoria, Aplicação prática, Dicas e Truques, Testo, 2009.
- [38] S. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, 4ª ed., Mc Graw Hill, 2003.
- [39] W. R. Finney, M. M. Hodowanec e W. G. Holter, “An Analytical Approach to Solving Motor Vibration Problems,” 1999.
- [40] R. C. Sampaio, “Avarias típicas e respectiva sintomatologia,” [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/0B3tF-4KsCSu1NzMwZmQ0YTQtNTVmOC00YjQxLWE5ZjktZDE5ZTdmYzQxM2Q3/view>. [Acedido em 27 dezembro 2018].
- [41] P. O. Rezende e M. I. Samesima, “Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico”.
- [42] A. Muszynska, Rotordynamics, Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2005.
- [43] Mobius Institute, “Vibration Analysis Definitions,” Mobius Institute, 2019. [Online]. Available: <https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=8047&iVibe=1&sTitle=Induction%20motors>. [Acedido em 15 agosto 2019].
- [44] A. Fitzgerald, C. Kingsley e S. Umans, Electric Machinery, 6ª ed., Mc Graw-Hill, 2003.

- [45] D. Irwin e M. Nelms, Basic Engineering Circuit Analysis, 10ª ed., Wiley.
- [46] M. F. Alves, ABC das Máquinas Elétricas, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2003.
- [47] B. T. Vieira da Silva, “Bancada para análise de vibração: Análise de falhas em máquinas rotativas,” Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade de Taubaté, Taubaté, Brasil, 2012.
- [48] C. V. Franco, “Desenvolvimento de uma bancada de testes para motores elétricos,” Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2014.
- [49] G. P. Viajante, “Projeto, implementação e automação de uma bancada para ensaios de motores de indução monofásicos,” Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiás, Brasil, 2009.
- [50] I. A. Macedo de Lima, “Proposição de uma bancada didática para análise de vibração em manutenção preditiva,” Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2014.
- [51] H. Toliyat, S. Nandi, S. Choi e H. Meshgin-Kelk, Electric Machines - Modeling, Condition Monitoring and Fault Diagnosis, T. a. F. Group, Ed., CRC Press, 2013.
- [52] A. C. Moreira, L. R. Lisita, J. W. Nerys e A. Batista, “Measurement and Signal Processing using Labview,” 2004.
- [53] National Instruments, LabView - User Manual, 2003.
- [54] L. V. Da Cunha, Desenho Técnico, 11ª ed., Fundação Calouste Gulbenkian, 2010.



<http://www.sotofilhos.com.br/biblioteca/Noticias/Causas,%20Danos,%20Queima,%20tipicas%20de%20Falhas%20em%20Enrolamentos%20de%20Motores%20Eletricos%20Trifasicos.html> (última consulta a 20 de outubro de 2018)

<http://ensus.com.br/analise-de-vibracao-tipos-de-sinais-transformada-de-fourier-e-psd/> (última consulta a 20 de outubro de 2018)

<https://www.soma.eng.br/> (última consulta a 27 de outubro de 2018)

<https://auttom.com.br/> (última consulta a 28 de outubro de 2018)

<https://spectraquest.com/> (última consulta a 10 de outubro de 2018)

<http://www.expt.pt/> (última consulta a 10 de novembro de 2018)

<https://www.gunt.de/en/> (última consulta a 10 de novembro de 2018)

<https://www.tequipment.com/#header> (última consulta a 10 de novembro de 2018)

<https://www.intelitek.com/> (última consulta a 10 de novembro de 2018)

<http://www.p-a-hilton.co.uk/index.php> (última consulta a 10 de novembro de 2018)

<http://www.equiditec.pt/intro/home> (última consulta a 10 de novembro de 2018)

<https://www.lucas-nuelle.us/> (última consulta a 10 de novembro de 2018)

<https://www.mobiusinstitute.com/site2/item.asp?LinkID=2001> (última consulta a 27 de dezembro de 2018)

<https://power-mi.com/content/demodulation-or-envelope-analysis> (última consulta a 25 de fevereiro de 2019)

<https://www.bkvibro.com/en.html> (última consulta a 11 de junho de 2019)



## Apêndices

### Apêndice A – Tabela resumo da sintomatologia de danos em motores elétricos de indução

Tabela 10 Tabela resumo da sintomatologia em motores elétricos de indução

Tipo de Dano	Sintomas		
	Análise de Vibrações	Análise de corrente	Análise Termográfica
<b>Desequilíbrio</b>	1xRPM na direção radial 2xRPM, 3xRPM, ou 4xRPM para desequilíbrio severo Baixa amplitude na direção radial, exceto para rotor suspenso Aumento das amplitudes com aumento da rotação, massa de desequilíbrio e distância da massa ao centro do rotor	$f_{unb} = \left[ \frac{k(1-s)}{p} + 1 \right] f_e$	Nada a referir
<b>Desalinhamento</b>	<b>Angular:</b> 1xRPM e 2xRPM e diferença de fase de 180°, na direção axial <b>Paralelo:</b> Componente 2xRPM ligeiramente superior e diferença de fase de 180°, nas direções axial e radial <b>Desalinhamento severo:</b> Várias harmónicas com amplitude elevada	$f_{mis} = (f_e \pm k f_r)$	Aumento da temperatura nos locais de acoplamento, rolamentos e chumaceiras
<b>Empeno</b>	1xRPM, 2xRPM e 3xRPM, na direção axial. Possível aparecimento de 1xRPM e 2xRPM na direção radial Diferença de fase de 180° na direção axial, e de 0° na direção radial	Nada a referir	Nada a referir
<b>Desaperto</b>	Elevado ruído de chão 1xRPM e 2xRPM na direção radial Baixa amplitude na direção axial Várias harmónicas, subarmónicas e interarmónicas Relação de fase aleatória	Nada a referir	Nada a referir

	Relação de fase de 90° a 180° entre o motor e o fixe para apoio desapertado		
<b>Fricção do rotor no estator</b>	Sinal no tempo sinusoidal com deformação no momento do contacto Várias harmónicas, subarmónicas e interarmónicas da frequência de rotação na direcção radial	Nada a referir	Aumento da temperatura e expansão térmica do local
<b>Rolamentos</b>	$f_{ext} [Hz]$ $= \frac{N_e}{2} f_r [1 - \frac{d_b}{d_p} \cos(\beta)]$ $f_{int} [Hz]$ $= \frac{N_e}{2} f_r [1 + \frac{d_b}{d_p} \cos(\beta)]$ $f_{rol} [Hz]$ $= \frac{d_p f_r}{2 d_b} [1 - (\frac{d_b}{d_p} \cos(\beta))^2]$ $f_{gai} [Hz]$ $= \frac{1}{2} f_r [1 - \frac{d_b}{d_p} \cos(\beta)]$ $f_{ext} [Hz] = 0.4 N_e f_r$ $f_{int} [Hz] = 0.6 N_e f_r$ $f_{rol} [Hz] = 0.23 N_e f_r (N_e < 10)$ $f_{rol} [Hz] = 0.18 N_e f_r (N_e \geq 10)$ $f_{gai} [Hz] = 0.4 f_r$	$f_{der} =  f_e \pm k f $	Aumento da temperatura do próprio rolamento
<b>Excentricidade</b>	<b>Estática:</b> $2f_e, f_{exes} = \left[ (k N_c) \frac{(1-s)}{p} \pm v \right] f_e$ <b>Dinâmica:</b> bandas laterais de frequência de escorregamento em torno de $f_r$ e $2f_e$ $f_{exdi} = \left[ (k N_c \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm v \right] f_e$ $f_{exbf} = 2f_e \pm f_r$	$f_{ex} = \left[ (k N_c \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm n \right] f_e$ $f_{exbf} =  f_e \pm k f_r $	Nada a referir
<b>Barras partidas</b>	Vibração axial $f_{bp} = f_r \pm 2s f_e$ Bandas laterais de frequência de escorregamento e passagem dos polos em torno de 1xRPM e bandas laterais de passagem dos polos em torno de $f_e, 5f_e$ e $7f_e$	$f_{bp} = (1 \pm 2ks) f_e$ $f_{bpbf} = [n(1-s) \pm s] f_e$	Aquecimento do motor nas zonas específicas de quebra das barras e anéis condutores
<b>Omissão de fase</b>	1xRPM, 2xRPM, $f_e, 2f_e$ e respectivas subarmónicas Possível aparecimento de bandas laterais de 1xRPM em torno de $2f_e$	Omissão de valores para uma das fases Aumento de $\sqrt{3}$ na amplitude das correntes das fases saudáveis. Diferença de fase de 180° entre fases saudáveis	Sobreaquecimento dos enrolamentos não danificados

<b>Curto-circuito</b>	1xRPM e $2f_e$	$f_{cc} = \left[ n \pm \left( \frac{k}{p} \right) (1 - s) \right] f_e$	Sobreaquecimento dos enrolamentos que aumenta com a gravidade do curto-circuito
<b>Desequilíbrio de fases</b>	1xRPM $2f_e$ , $(2f_e \pm \frac{f_e}{3})$ e $4f_e$	Nada a referir	Padrão térmico irregular nas três fases

**Legenda:**  $f_r$  - frequência de rotação do rotor,  $f_e$  - frequência de alimentação do estator,  $s$  - escorregamento,  $p$  - número de pares de polos,  $k$  - número inteiro positivo,  $m$  - número inteiro,  $n$  - inteiro ímpar,  $v$  é um numero par,  $f$  - frequência característica do dano existente ( $f_{ext}$ ,  $f_{int}$ ,  $f_{rol}$  ou  $f_{gai}$ ),  $N_c$  é o número de cavas do rotor,  $N_e$  - número de esferas,  $d_b$  - diâmetro das esferas,  $d_p$  - diâmetro do passo da esfera,  $\beta$  - ângulo de contacto entre a esfera e a pista,  $n_d = 0$  quando a excentricidade é estática e  $n_d = 1, 2, 3, \dots$  quando a excentricidade é dinâmica.



## Apêndice B - Demonstração experimental. Simulação de danos

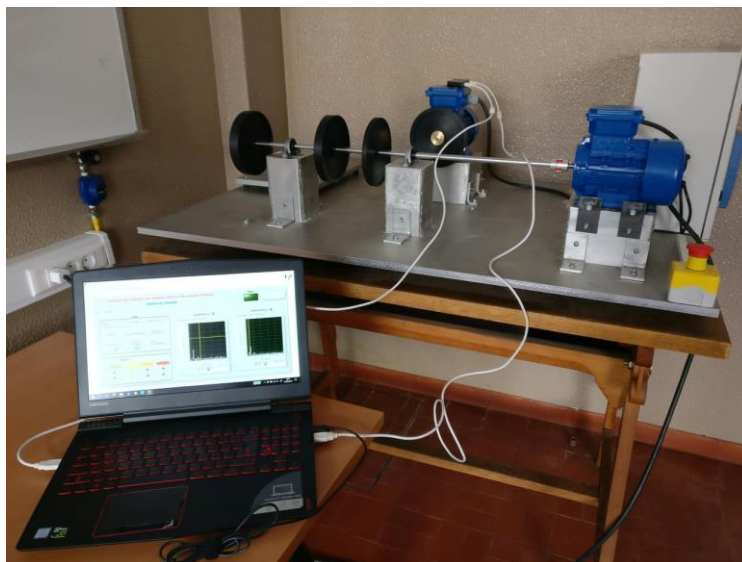


Figura 125 Atividade experimental em bancada Escola Naval



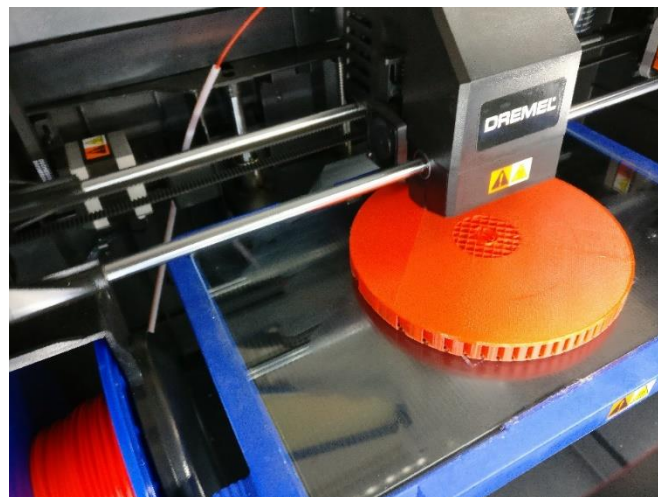
Figura 126 Atividade experimental em bancada *Spectraquest*



**Figura 127 Desequilíbrio - Rotor com massa de desequilíbrio**

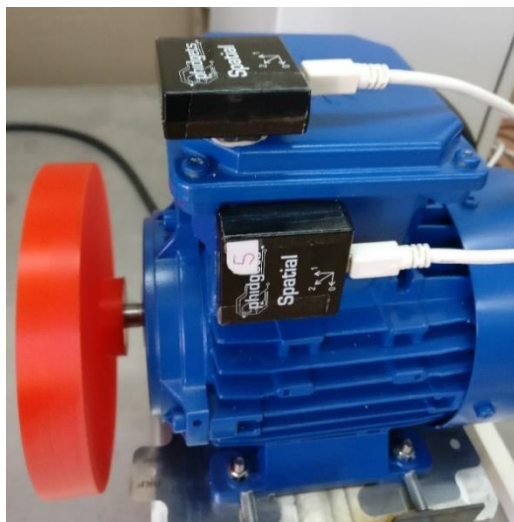


**Figura 128 Transformador de corrente instalado em uma das fases de motor elétrico**



**Figura 129 Impressão de rotor para simulação de desequilíbrio**

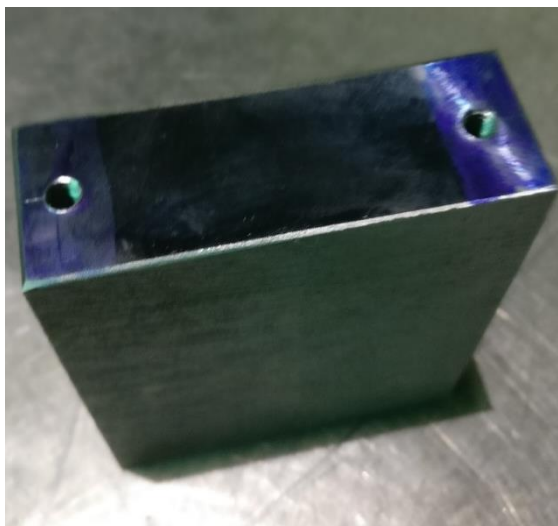




**Figura 130 Rotor impresso instalado em motor elétrico**



**Figura 131 Maquinação de componentes para construção de bancada didática**



**Figura 132 Chumaceiras com furos roscados para implementação de chumaceira *Phidjets***



**Figura 133 Processo de montagem de bancada didática**

## Apêndice C – Desenho técnico da base da bancada didática

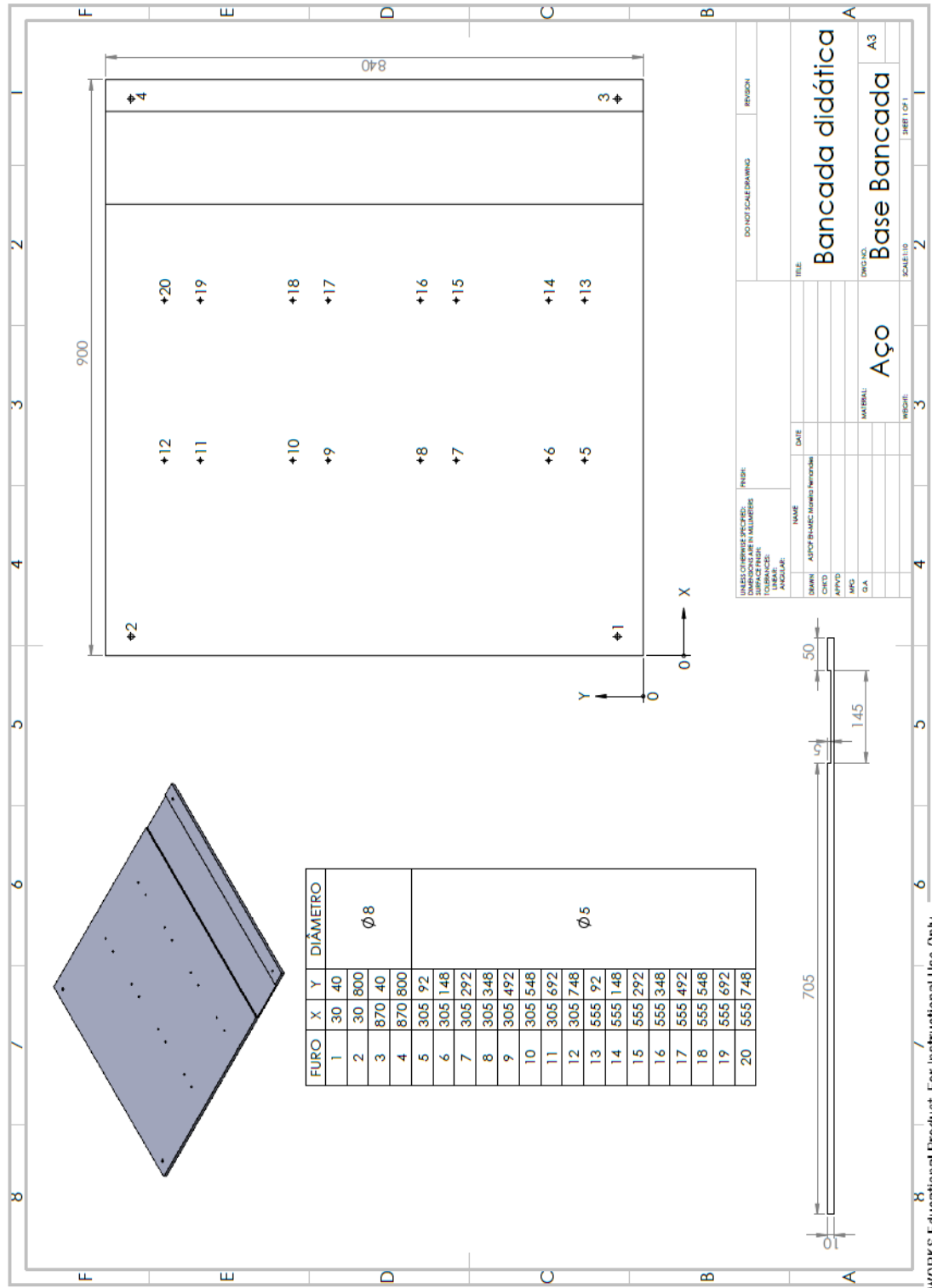


Figura 134 Desenho técnico da base da bancada didática



Technical drawing of a mechanical part, "Base motor". The drawing includes three views: a front view, a top view, and a side view. The front view shows a rectangular plate with a width of 200 mm and a height of 145 mm. It features four holes arranged in a 2x2 grid. The top view shows a rectangular plate with a width of 200 mm and a height of 145 mm. It features four holes arranged in a 2x2 grid. The side view shows a rectangular plate with a width of 47 mm and a height of 25 mm. It features two holes arranged in a 1x2 grid. A table of hole specifications is provided below the views.

FURO	X	Y	DIÂMETRO
1	50	32,50	$\varnothing 7$ $\varnothing 15 \pm 0,22$
2	50	112,50	$\varnothing 7$ $\varnothing 15 \pm 0,22$
3	150	32,50	$\varnothing 7$ $\varnothing 15 \pm 0,22$
4	150	112,50	$\varnothing 7$ $\varnothing 15 \pm 0,22$

169



## Apêndice E – Desenho técnico das chumaceiras da bancada didática

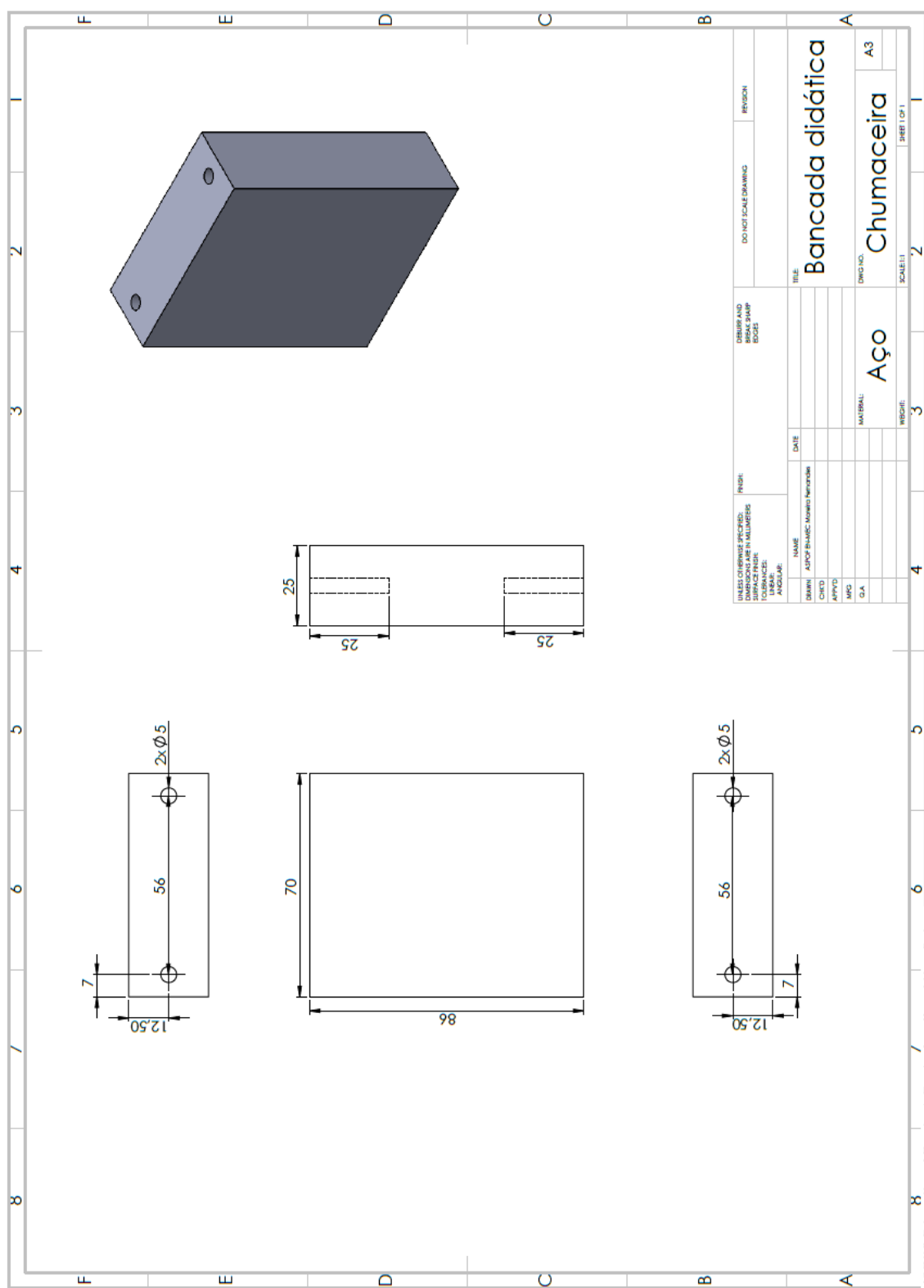


Figura 136 Desenho técnico das chumaceiras da bancada didática





## Anexos

### Anexo A – Termografia: Tabela com valores de emissividade de referência para diversos materiais

Tabela 11 Valores de referência de emissividade para diversos materiais <sup>57</sup>

Material	Temperatura (°C)	Emissividade ( $\epsilon$ )
Alumínio brilhante	170 °C	0,04
Alumínio não oxidado	25 °C /100 °C	0,02/0,03
Alumínio altamente polido	100 °C	0,09
Ferro fosco	20 °C	0,24
Ferro com cobertura	100 °C	0,80
Cobre não polido	20 °C	0,04
Cobre oxidado	130 °C	0,76
Cobre enrolado	40 °C	0,64
Aço tratado	200 °C	0,52
Aço oxidado	200 °C	0,79

---

<sup>57</sup> Valores retirados de [37]

Aço laminado	93 °C	0,75 a 0,85
Pintura preta	80 °C	0,97
Pontos de óleo	90 °C	0,92 a 0,96

## **Anexo B – Termografia. Métodos de determinação de emissividade dos corpos**

A emissividade de um corpo pode ser obtida empiricamente através de métodos como o método por contacto e o método com material de emissividade de referência [35].

São requisitos da aplicação destes métodos a existência de:

- Uma câmara termográfica calibrada que permita a introdução dos valores da temperatura da radiação refletiva e da emissividade;
- Um termómetro calibrado;
- Um material modificador de superfície, como tinta ou fita com emissividade elevada e conhecida, que possa ser utilizado junto da superfície do alvo.

O **método por contacto** apresenta o seguinte procedimento [35], [36]:

1. Colocar a câmara termográfica no local e à distância desejada do objeto a ser medido;
2. Medir e compensar a temperatura da radiação refletiva conforme o apresentado no Anexo C;
3. Apontar e focar a câmara no objeto e, se possível, fixar a imagem, por exemplo recorrendo a um tripé;
4. Usar a função de medição da câmara mais apropriada para definir um ponto ou área de medição no centro da imagem da câmara;
5. Usar o termómetro para medir a temperatura do ponto ou área que ficou definido pela função de medição da câmara;
6. Sem mover a câmara, ajustar o valor de emissividade até que a temperatura indicada seja a mesma que a temperatura obtida pelo termómetro. O valor de emissividade indicado é o valor de emissividade do objeto;
7. Repetir o processo anterior, no mínimo três vezes, e retirar a média das emissividades;
8. Introduzir o valor médio das emissividades na câmara termográfica.

E o **método com material de emissividade de referência**, utilizando-se fita isolante, apresenta o seguinte procedimento [35], [36]:

1. Colocar a câmara termográfica no local e à distância desejada do objeto a ser medido;
2. Medir e compensar a temperatura da radiação refletiva conforme o apresentado no Anexo C;
3. Aplicar a fita, com valor de emissividade conhecido, sobre o objeto ou imediatamente adjacente a este;
4. Ajustar a emissividade da câmara com o valor de emissividade da fita;
5. Apontar e focar a câmara sobre a fita e esperar que as temperaturas estabilizem (transmissão de calor por contacto);
6. Medir a temperatura da fita;
7. Remover a fita ou apontar e focar a câmara no objeto imediatamente adjacente à fita adesiva. Se possível fixar a câmara;
8. Retirar a temperatura do objeto, sem a fita;
9. Ajustar a emissividade, na câmara, até que a temperatura indicada pelo objeto seja a mesma que a obtida com a fita. O valor de emissividade indicado é o valor de emissividade do objeto;
10. Repetir o processo anterior, no mínimo três vezes, e retirar a média das emissividades;
11. Introduzir o valor médio das emissividades na câmara termográfica.

## Anexo C – Termografia. Métodos de determinação de refletividade dos corpos

A refletividade de um corpo pode ser determinada empiricamente pela aplicação de dois métodos: o método refletor e o método direto. Para a aplicação de ambos é necessário [35]:

1. Uma câmara termográfica calibrada que permita ao utilizador introduzir os valores de temperatura refletida e emissividade;
2. Um refletor de infravermelhos, como por exemplo um pedaço de papel de alumínio com superfície áspera e com o lado brilhante sobre um pedaço de papelão (reflexão difusa).

O **método refletor**, presente na Figura 137, deve seguir os seguintes passos [35]:

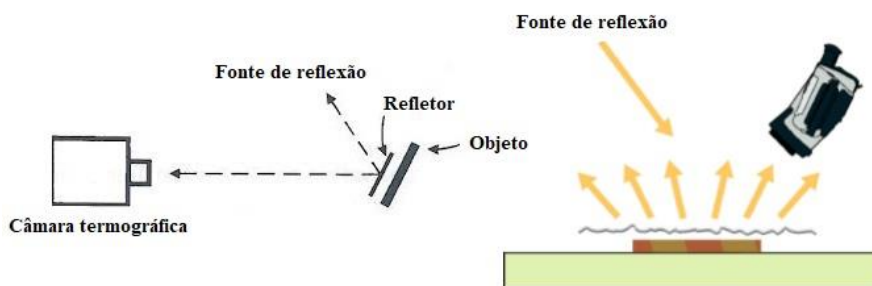


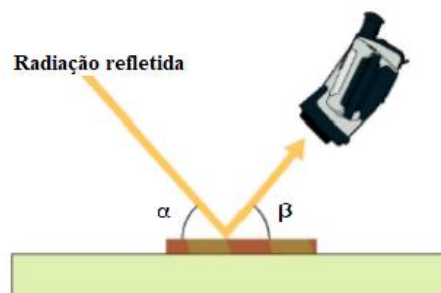
Figura 137 Método refletor <sup>58</sup>

1. Ajustar a emissividade na câmara para  $\varepsilon = 1$  e distância zero;
2. Colocar a câmara termográfica no local e à distância desejada do objeto a ser medido;
3. Colocar o refletor paralelamente à superfície do objeto;
4. Sem mover a câmara, medir a temperatura da radiação refletida da superfície do refletor;
5. Repetir o processo anterior, no mínimo três vezes, e retirar a média das emissividades;
6. Introduzir o valor médio das temperaturas obtidas na câmara termográfica.

E o **método direto**, presente na Figura 138, deve seguir os seguintes passos [35]:

---

<sup>58</sup> Retirado de [35]



**Figura 138 Método direto - passo 2** <sup>59</sup>

1. Ajustar a emissividade na câmara para  $\varepsilon = 1$  e distância zero;
2. Colocar a câmara termográfica no local e à distância desejada do objeto a ser medido. Estimar o ângulo de reflexão  $\alpha$  e o ângulo de incidência  $\beta$  ao visualizar o objeto com a câmara a partir desse local, por forma a que  $\alpha = \beta$ ;
3. Posicionar a câmara de forma a que esteja no ângulo  $\alpha$ , e veja as fontes refletivas pelo objeto;



**Figura 139 Método direto - passo 3** <sup>60</sup>

4. Medir a temperatura da radiação refletida por essa(s) fonte(s), com a câmara. Útil utilizar os recursos disponíveis na câmara, como a média;
5. Repetir o processo anterior, no mínimo três vezes, e retirar a média das emissividades;
6. Introduzir o valor médio das temperaturas obtidas na câmara termográfica.

<sup>59</sup> Retirado de [35]

<sup>60</sup> Retirado de [35]

## Anexo D – Medidas do motor elétrico NORDAC 63 L 4

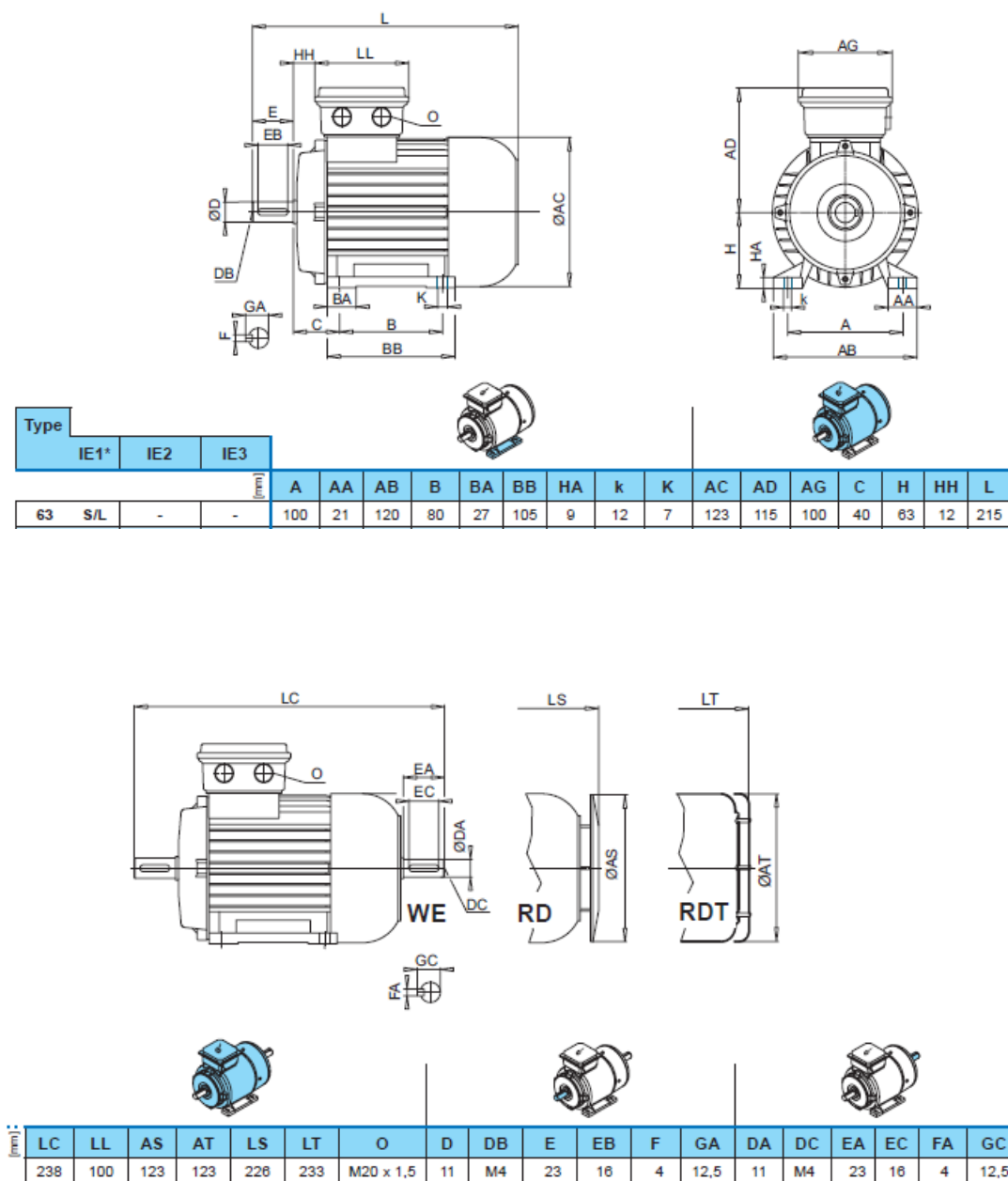


Figura 140 Medidas motor elétrico NORDAC 63 L 4 <sup>61</sup>

<sup>61</sup> Retirado de [55]





## Anexo E – Desenho técnico das chumaceiras *Phidgets*

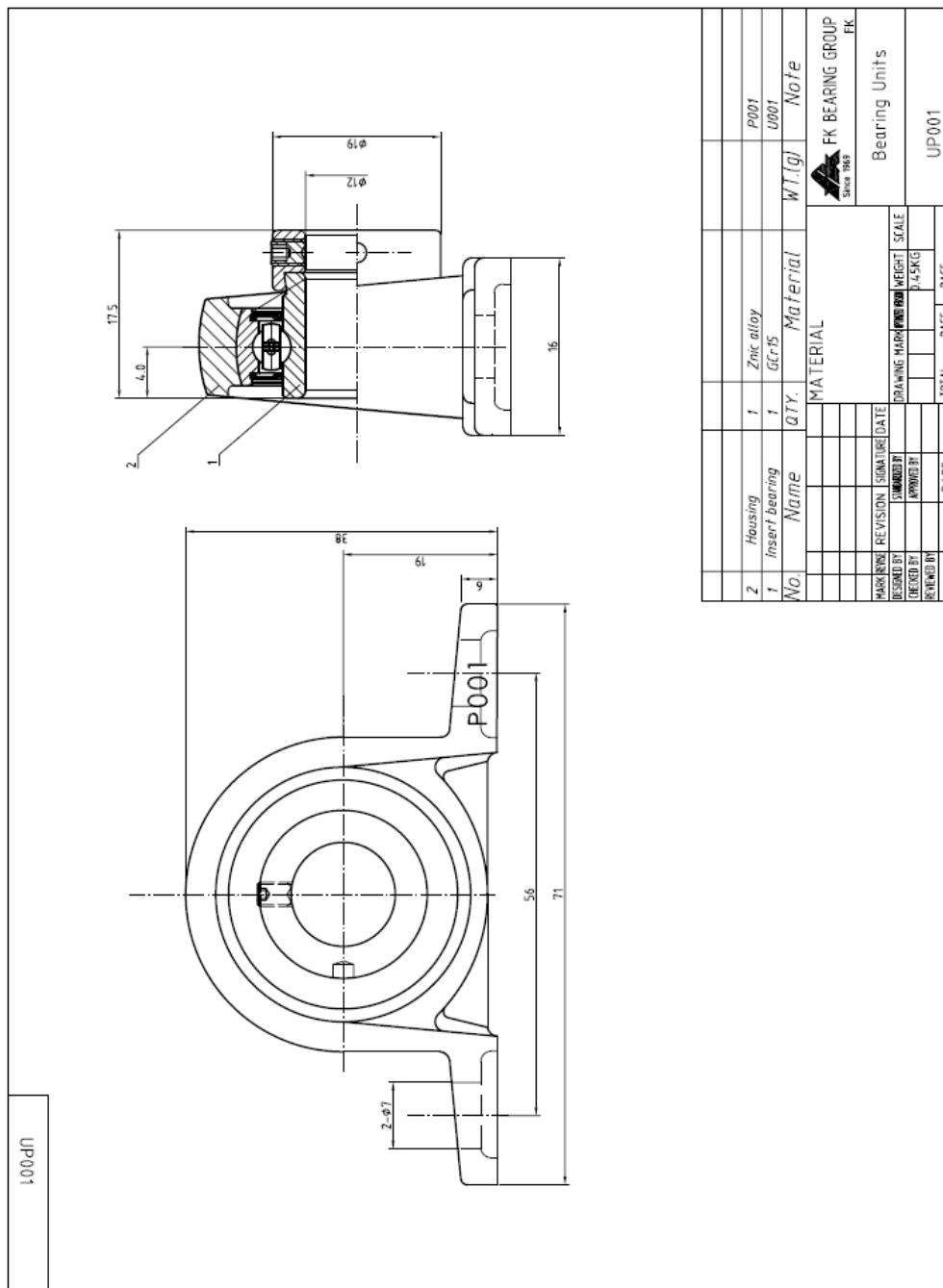


Figura 141 Desenho técnico chumaceira Phidgets <sup>62</sup>